

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**  
**présenté pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie**  
**Approfondie**

**spécialisation : AGROTIC (Technologies de l'Information et de la  
Communication)**

**Pertinence des données MODIS VCF au Mali :**  
**- Mise en place d'une validation des taux de**  
**couvert forestier**

par  
**Pierre GLÉMAS**

**Année de soutenance : 2007**

**Organisme d'accueil : Unité Propre de Recherche Ressources forestières et  
Politiques publiques (UPR 36), CIRAD**

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**  
**présenté pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie**  
**Approfondie**

**spécialisation : AGROTIC (Technologies de l'Information et de la  
Communication)**

**Pertinence des données MODIS VCF au Mali :**  
**- Mise en place d'une validation des taux de**  
**couvert forestier**

par  
**Pierre GLÉMAS**

**Mémoire préparé sous la direction de :**  
**Nicolas Devaux**  
**Présenté le : 25/09/2007**

**Organisme d'accueil : UPR36 CIRAD**

**Maître de Stage : Laurent Gazull**

## **Abstract :**

Deforestation is a major stake from the 21<sup>th</sup> century. Mali is facing this problem because 90 percent of his domestic energy comes from the combustion of wood. The Malian government decided to take control and follow-up measures in order to stop the deforestation phenomenon.

Classics forest inventory methods are very expensive, that's why the CIRAD decided to test the quality of MODIS VCF product. These satellite images at 500 m resolution give rate of the cover forest on all the earth surfaces. These are free images, created by the NASA, which can be interesting for forest inventory.

The following study tries to evaluate the MODIS VCF images quality comparing to satellite images at very high resolution. To do that, we had to create a reference image. This image has been created by a supervised classification. The reference image is after that compared to MODIS results.

It appeared that the MODIS VCF images under estimate the forest cover in the Malian region and that there is no relation to obtain the real value from MODIS results. MODIS VCF must be used carefully in the Malian region.

**Keywords :** MODIS VCF, SPOT 5, follow-up of the woody ressource, teledetection

## Résumé :

La déforestation est un enjeu majeur du 21<sup>ème</sup> siècle. Le Mali est confronté à ce problème car 90 % de son énergie domestique sont fournis par la combustion du bois. Le gouvernement malien a décidé de mettre en place des mesures de suivi et de contrôle de la ressource ligneuse pour essayer d'endiguer le phénomène de déforestation.

Les méthodes d'inventaire forestier classiques étant très onéreuses, le CIRAD a décidé d'évaluer la qualité des données MODIS VCF. Ces cartes à 500 m de résolution donnent le taux de couvert forestier sur tout le globe. Ce sont des images gratuites, créées et mises à disposition par la NASA, qui pourraient être intéressantes pour le suivi de la ressource ligneuse.

Mon étude vise à évaluer la qualité des données MODIS VCF en les comparant à des images satellites à très haute résolution. Pour ce faire, il m'a tout d'abord fallu créer une carte de référence. Cette carte a été établie sur la base d'image SPOT 5 par classification supervisée, par la méthode du minimum des distances, en deux classes : forêt, sol nu. J'ai ensuite comparé les données MODIS à ma carte de référence pour évaluer la fiabilité des données gratuites.

Il ressort de mon étude que les données MODIS VCF sous estiment le couvert forestier dans la région d'étude et qu'il n'y a pas un biais systématique permettant de remonter à la valeur vraie. Il faut donc rester prudent lors de son utilisation en zone sahélienne et il faudrait approfondir l'évaluation de MODIS VCF avec des méthodes plus robustes comme des inventaires de terrain.

**Mots clés :** MODIS VCF, SPOT 5, suivi de la ressource ligneuse, télédétection



## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Laurent Gazull pour sa patience et la manière dont il a su encadrer mon stage. Je le remercie d'avoir su me faire gagner en compétence sur divers domaines comme le SIG et les arbres. Je le remercie aussi de m'avoir permis de découvrir l'Afrique en m'envoyant en mission au Mali. J'y ai découvert un pays et des gens extraordinaires.

Je remercie Nicolas Devaux, mon tuteur, d'avoir toujours été là pour répondre à mes questions intelligentes ou pas.

Je souhaite également remercier le grand Monsieur chevelu, du bureau B 208 du CIRAD Baillarguet dont j'ai partagé le bureau à temps partiel pendant 6 mois. Jeff, merci d'avoir toujours essayé de m'aider.

Je remercie Christine Brognoli pour les deux semaines que nous avons passées en territoire hostile.

Je remercie énormément Denis Gautier pour l'accueil qu'il nous a réservé au Mali et je suis enchanté qu'il m'ait fait découvrir le point G... Je tiens aussi à remercier Doe Coulibaly technicien de l'IER Bamako, et Check pour les moments passés sur le terrain et pour la patience dont ils ont fait preuve à nous expliquer les us et coutumes du Mali.

Je remercie aussi du fond du coeur Ablo Konaté qui nous a hébergé chez lui deux semaines et qui nous a donné tout ce qu'il avait ainsi que ce qu'il n'avait pas, je n'oublierai pas la générosité dont il a fait preuve avec nous.

Je remercie Vévé, Fantou, Seb, Gérard et Décla pour tous les lundi matin difficiles, pour tous les beach rugby,... Merci les amis d'avoir toujours cru qu'un jour peut être je sauverais L'Afrique avec mes images satellites...

Je remercie Sylvain de m'avoir appris que pour que le touchpad de l'ordinateur marche mieux, il faut se lécher le doigt... Sylvain je suis pas convaincu...

Je remercie aussi mes compères stagiaires du CIRAD de Baillarguet. Merci pour ce covoiturage magique... Anna je te promets que je ne remonterai plus jamais dans une Fiat Uno espagnole ou que je n'ouvrirai pas grand les vitres...

Merci à tous les agrotics d'avoir animé mes pauses avec un forum de copains qui régale.

# Glossaire

**CEMAGREF** : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts  
**CIRAD** : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement  
**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique  
**FAO** : Food and Agriculture Organization  
**IBS** : Indice de Brillance des Sols  
**IC** : Indice de Cuirasse  
**IER** : Institut d'Économie Rurale (équivalent de l'INRA au Mali)  
**IFREMER** : Institut Français pour l'Exploitation de la MER  
**INRA** : Institut National de Recherche Agronomique  
**INRIA** : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique  
**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement  
**LAI** : Leaf Area Index  
**MODIS** : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
**NASA** : National Aeronautics and Space Administration  
**NDVI** : Normalize Difference Vegetation Index  
**NIR, PIR** : Near InfraRed, Proche InfraRouge  
**PVI** : Perpendicular Vegetation Index  
**SPOT** : Système Probatoire d'Observation de la Terre  
**VCF** : Vegetation Continuous Field

# Table des matières

<b>Abstract :</b>	<b>3</b>
<b>Résumé :</b>	<b>4</b>
<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>Glossaire</b>	<b>6</b>
<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>Partie 1. Contexte</b>	<b>13</b>
<b>1. La structure d'accueil : le CIRAD [3]</b>	<b>13</b>
<b>2. Présentation de la zone d'étude (Contexte géographique)</b>	<b>14</b>
2.1. Situation géographique et climatique	14
2.2. La ressource ligneuse au Mali	15
<b>3. Nécessité d'assurer un suivi de la ressource ligneuse au Mali</b>	<b>17</b>
<b>Partie 2. Bilan de l'existant et Problématique</b>	<b>19</b>
<b>1. Mise en place d'une solution technique aux problèmes d'évaluation et de suivi du couvert forestier malien</b>	<b>19</b>
1.1. Facteurs à prendre en compte	19
1.2. Bilan de l'existant en matière de détection du couvert forestier	19
Méthode de terrain	19
Méthodes basées sur l'analyse d'image	19
Méthodes utilisant des indices de végétations	20
<b>2. Les données MODIS</b>	<b>21</b>
<b>3. Bilan des travaux existants sur les différents produits MODIS</b>	<b>22</b>
<b>Partie 3. Matériels et méthodes</b>	<b>24</b>
<b>1. Méthodologie générale</b>	<b>24</b>
1.1. Calcul du taux de couvert	24
1.2. Comparaison carte de référence/carte MODIS	24
<b>2. Le Choix des images satellites</b>	<b>24</b>
2.1. La résolution des images	24
2.2. Le choix des dates d'acquisition des images	26
2.3. Les scènes disponibles	27
2.4. Les images SPOT 5	27
2.5. Vérification du géoréférencement des données	28
<b>3. Méthodes mises en place</b>	<b>29</b>
3.1. Postulats de travail	29
3.2. Choix de quatre sites représentatifs des quatre types de formations végétales	29
3.3. Création de la carte de référence	30
3.4. Évaluation de la qualité de la carte de référence	31

<b>Partie 4. Résultats, Discussion.....</b>	<b>33</b>
<b>1. Création de la carte de référence.....</b>	<b>33</b>
1.1. Mise en place de l'échantillon d'apprentissage pour la classification supervisée.....	33
1.2. Mise en place de la classification supervisée.....	34
1.3. Création de l'échantillon test.....	34
1.4. Évaluation de la qualité de la carte de référence.....	35
Évaluation des résultats sur la zone de savane verger.....	35
Évaluation des résultats sur la zone de forêt classée.....	35
Évaluation des résultats sur la zone de savane arbustive.....	35
Évaluation des résultats sur la zone de bowé.....	36
Évaluation générale .....	36
<b>2. Résultat de la comparaison avec les données VCF MODIS .....</b>	<b>37</b>
2.1. Résultats généraux sur la zone d'étude.....	37
2.2. Résultats locaux suivants le type de formation végétale.....	39
<b>3. Ce qui peut expliquer les écarts entre la carte de référence et les données MODIS dans la zone.....</b>	<b>40</b>
3.1. La précision de la classification.....	41
3.2. Le Changement d'échelle.....	41
3.3. Le décalage temporel.....	42
3.4. Le décalage spatial.....	42
<b>4. Comparaison entre LANDSAT et la classification.....</b>	<b>42</b>
4.1. L'images LANDSAT.....	42
4.2. Création d'une image de NDVI.....	43
4.3. Résultats de la comparaison NDVI LANDSAT-Taux de couvert forestier.....	43
<b>Partie 5. Conclusion Discussion.....</b>	<b>45</b>



## Table des tableaux

Tableau 1: Exemples d'images satellitales disponibles, de leur résolution et de leur prix (image d'archive).....	20
Tableau 2 : Bandes spectrales acquises par MODIS [14].....	22
Tableau 3: Tableau récapitulatif des largeurs spectrales et de la résolution spatiales des bandes acquises par SPOT 5 [26].....	28
Tableau 4 : Matrice de corrélation, issue d'une ACP réalisée sous le logiciel IDRISI, entre les bandes de l'image Spot 5 multicanaux et le canal panchromatique sur la zone d'étude.....	28
Tableau 5: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de savane verger (en ligne).....	35
Tableau 6: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de forêt classée (en ligne).....	35
Tableau 7: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de savane arbustive (en ligne).....	36
Tableau 8: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de bowé (en ligne).....	36
Tableau 9: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur toute la zone d'étude (en ligne).....	36
Tableau 10: Propriété spectrale et résolution spatiale de l'image LANDSAT [29].....	43



## Index des figures

Figure 1: Carte du Mali. Le rectangle rouge localise la commune de Zancoulibaly.....	14
Figure 2: Extraits de l'image multispectrale SPOT 5 montrant chacune un des types de formations végétales. A : Forêt classée, B : savane verger, C : savane arbustive et D : bowé.....	16
Figure 3: Carte IGN de la zone d'étude. ....	17
Figure 4: Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une bande isolée [Fonctionnement et gestion].....	25
Figure 5: Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une structure de brousse tigrée[24].....	26
Figure 6: Composition colorée issue de l'image SPOT 5 multispectrale de la zone de travail avec les différents sites retenus pour la mise en place des bases d'apprentissage et de test.....	30
Figure 7: Compte numérique dans le rouge en fonction du compte numérique dans l'infrarouge pour 1 200 points placés régulièrement sur la zone et typés par photo-interprétation de l'image multicanal SPOT 5. ....	31
Figure 8: Moyenne et écart type de compte numérique du sol et de la forêt de mon échantillon d'apprentissage pour chaque canaux. En abscisse : les numéros de canaux avec dans l'ordre: l'infrarouge (1), le rouge (2), le vert (3), le panchromatique (4) et le NDVI (5). En ordonnée : compte numérique.....	33
Figure 9: Résultats de la classification supervisée par la méthode des distances minimales sur les 5 canaux.....	34
Figure 10: Histogramme de répartition des résidus en proportion. En ordonnées, en multipliant par 100, on tombe sur la fréquence d'apparition des résidus. La barre rose représente la moyenne de résidus (37%).....	37
Figure 11: Distribution cumulée des résidus, l'ordonnée est en proportion de pixels la barre rose représente la moyenne des résidus (37 %). ....	38
Figure 12: Carte des résidus entre la carte de pourcentage forestier calculé à partir de la classification et les données MODIS à une résolution de 500 m. La zone en blanc représente le fleuve Niger qui n'a pas été prise en compte dans le calcul des résidus.....	39
Figure 13: Extrait de la zone de forêt classée avec la grille de calage à 500 m de résolution. À gauche il y a la composition colorée issue de l'image SPOT 5 multicanaux et à droite, les valeurs données par la classification (bleu) et MODIS en (rouge) dans les pixels.....	40
Figure 14: Courbe du taux de couvert forestier en fonction du NDVI calculé à partir des images LANDSAT à trois résolution. A : résolution 125 m, B : résolution 250 m, C : résolution 500 m.....	44

## Table des annexes

Annexe 1. Photographie d'une zone de forêt classée dans la forêt de la Faya.....	50
Annexe 2. Photographie d'une zone de savane arbustive. ....	50
Annexe 3. Photographie d'une zone de parc verger. Les sillons de cultures sont bien apparent ainsi que les karités.....	51
Annexe 4. Photographie d'une zone de bowal. Les zones de sol nu indurées peuvent être très vastes, les zones de végétation sont visibles dans le fond de la photographie.....	51
Annexe 5. Tableau récapitulant la taille (en ha) des échantillons de tests de la classification par type de formation végétale et par type de couvert (sol nu ou forêt).....	52
Annexe 6. Tableau récapitulatif donnant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 500 m.....	53
Annexe 7. Tableau récapitulant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne du NDVI par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 250 m.....	54
Annexe 8. Tableau récapitulant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 125 m.....	55
Annexe 9. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage forestier MODIS sur la zone de la forêt classée de la Faya.....	56
Annexe 10. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage de couvert MODIS sur la zone de savane arbustive.....	57
Annexe 11. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de savane verger.....	58
Annexe 12. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de bowé.....	59
Annexe 13. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 500 m.....	60
Annexe 14. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 250 m.....	61
Annexe 15. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 125 m.....	62

## Introduction

Les problématiques environnementales sont aujourd'hui au coeur de tous les débats. La déforestation est une des conséquences de l'activité humaine la plus alarmante de notre siècle [1]. Devant le recul global de la biomasse ligneuse, de nombreuses organisations tirent la sonnette d'alarme. La disparition des espaces boisés, véritables puits de carbone, conduit à une augmentation de la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et donc au réchauffement climatique.

Dans les pays africains, 90 % de l'énergie domestique sont issus de la combustion du bois [2]. Dans ces pays en pleine expansion d'un point de vue démographique, la ressource ligneuse est surexploitée pour couvrir les besoins. Certains auteurs accusent l'exploitation forestière d'être une des principales causes de la déforestation en zone sèche. Néanmoins, à ce jour, ces liens sont loin d'être clairs et la déforestation est avant tout issue de la conversion des « brousses » en terres agricoles.

Le CIRAD et plus particulièrement l'UPR 36, dans lequel j'ai effectué mon stage, s'intéresse à cette évolution. Depuis 5 ans, le CIRAD a mis en place un partenariat avec l'Institut d'Economie Rurale (équivalent de l'INRA) au Mali, afin de suivre la dynamique de la ressource forestière.

Dans le cadre de ces actions, il serait intéressant pour les différents partenaires de disposer d'un ensemble d'outils peu onéreux et fiables d'évaluation de la ressource. L'outil « image satellitale » semble un des outils incontournables de ce type de dispositif.

La NASA propose aujourd'hui les cartes VCF MODIS gratuites à un pas de 500 m et qui donnent le pourcentage de couvert forestier sur tout le globe. Ces cartes pourraient servir au recensement et au suivi. Le problème est que ces cartes n'ont jamais été vérifiées sur la zone malienne et peu d'études valident ce produit. Les quelques travaux menés sur le produit VCF ont conclu qu'il était peu fiable.

Cette étude vise donc à mettre en place un protocole de vérification de la qualité des cartes MODIS VCF sur la zone malienne.

L'objectif général de ce stage est de valider les taux de couvert forestier donnés par MODIS VCF au moyen d'observations de terrain et d'images à très haute résolution.



## **Partie 1. Contexte**

Cette première partie va permettre de mieux cerner le contexte de l'étude. Dans un premier temps, la structure dans laquelle a été réalisée l'étude va être présentée. Puis, sera présenté la zone de l'étude avec quelques informations sur le climat, la géographie et le type de formation végétale présentes sur la zone. Dans un troisième temps, sera mise en évidence la nécessité du suivi de la ressource ligneuse au Mali.

### **1. La structure d'accueil : le CIRAD [3]**

Le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) est un établissement public à caractères industriel et commercial créé en 1984. Il est issu de la fusion de neuf instituts dédiés à la recherche tropicale. Organisme de recherche finalisée au service des pays du Sud, le CIRAD intervient dans plus de 50 pays du monde.

Tout au long de son histoire, il a noué et entretenu des liens étroits avec les sociétés humaines, les lieux de productions agricoles, animale et forestière, les milieux physiques et biologiques des pays tropicaux et subtropicaux.

La mission du CIRAD est de "contribuer au développement rural des pays tropicaux et subtropicaux par des recherches, des réalisations expérimentales, des actions de formation, en France et à l'étranger, l'information scientifique et technique, principalement dans les secteurs agricole, forestier et agroalimentaire." Pour mener à bien cette mission, le CIRAD dispose de trois départements, de 59 unités et d'un effectif de 1820 personnes.

Le CIRAD a choisi le développement durable comme ligne de force de son action à travers le monde. Cette démarche prend en compte les conséquences écologiques, économiques et sociales, à long terme, des processus de transformation des sociétés et des territoires du Sud. Le CIRAD intervient par des recherches et expérimentations, des actions de formation, d'information et d'innovation, et des expertises. Ses compétences relèvent des sciences du vivant, des sciences humaines et des sciences de l'ingénieur, appliquées à l'agriculture et l'alimentation, à la gestion des ressources naturelles et aux sociétés.

La majorité des recherches menées par le CIRAD se fait en partenariat. Les programmes que les chercheurs conduisent avec leurs partenaires sont conçus et réalisés en commun. Les partenaires du CIRAD sont nombreux et variés : pouvoirs publics, instituts de recherche, universités, entreprises privées, groupements de producteurs, organisations professionnelles paysannes, entreprises du secteur agroindustriel, organisations non gouvernementales...

Le CIRAD, grâce à ses recherches, propose à ses partenaires privés ou publiques un très large éventail de services et de produits. Leur valeur tient autant aux résultats scientifiques accumulés qu'au travail mené en coopération dans le cadre de conventions ou de projets internationaux multipartenaires.

Depuis sa création, le CIRAD a fait le choix d'une implantation scientifique forte et pérenne sur le territoire français. Son expertise dans les domaines clés de la biologie, des biotechnologies, de l'agronomie, de l'agro-alimentaire, de l'économie, de la socio-économique et de l'informatique appliquée est aujourd'hui reconnue dans la communauté scientifique. Il entretient des liens forts avec les organismes de recherche français. L'INRA est le partenaire scientifique majeur, avec lequel il partage les méthodes scientifiques. Avec

l'IRD, il partage la mission de développement. Il coopère aussi avec l'INRIA, le CEMAGREF, l'IFREMER et le CNRS.

L'Unité Propre de Recherche Ressources forestières et Politiques publiques (UPR 36) se positionne volontairement à l'interface des sciences biologiques et sociales. Elle propose une lecture des transformations conjointes environnement-sociétés qui prend en compte l'articulation entre niveaux local et global, afin notamment d'analyser la contribution et le rôle des forêts dans le développement durable des pays du Sud. Il s'agit d'accompagner la mise en œuvre de politiques et pratiques de gestion des arbres et des forêts, qui puissent concilier au mieux les intérêts des populations, le développement local et la protection de la biodiversité.

## 2. Présentation de la zone d'étude (Contexte géographique)

### 2.1. Situation géographique et climatique

L'étude porte sur la commune de Zancoulibaly à environ 100 km de Bamako. Cette zone participe activement à l'approvisionnement en bois-énergie de la capitale malienne.



Figure 1: Carte du Mali. Le rectangle rouge localise la commune de Zancoulibaly

La zone d'étude s'étend entre -7,17 et -7,57 degrés décimaux en longitude et entre 12,66 et 12,95 degrés décimaux en latitude. Soit une zone de 1386 km<sup>2</sup>.



La zone est dans le domaine climatique soudanien sud. La pluviométrie moyenne annuelle y est comprise entre 900 et 1200 mm. La saison sèche y est au moins aussi longue que la saison des pluies. Elle dure entre 6 et 8 mois d'octobre-novembre au mois d'avril.

La saison des pluies dure entre 4 et 6 mois. Le maximum des précipitations a lieu en juillet-août et le nombre de jours de pluie est compris entre 50 et 80 jours. L'évapotranspiration varie du sud au nord entre 1700 et 2200 mm/an [4].

## 2.2. La ressource ligneuse au Mali

Pour décomposer le milieu en plusieurs grands types de formations végétales, je me suis basé sur la classification du PIRL (Projet d'Inventaire des Ressources Ligneuses au Mali [4]).

La zone d'étude comporte quatre grands types de formation végétale malienne :

- les forêts classées qui sont des forêts protégées par l'État
- les savanes vergers, champs dans lesquels sont implantés de gros arbres comme le Karité.
- les savanes arbustives qui sont en fait bien souvent d'anciens champs laissés en jachère.
- les bowé, qui sont une alternance entre sol nu induré et buissons très denses.

Entre 1935 et 1960, une centaine de forêts et de réserves naturelles furent classées, avec un statut proche de celui des forêts domaniales françaises. L'arrêt des crédits extérieurs a mené à un abandon du domaine classé jusqu'en 1968, date à laquelle le fond forestier permettait de reprendre l'entretien du réseau de pare feu. Depuis, l'action en faveur du domaine classé n'a cessé de croître grâce à une volonté conjointe du Mali et de ses partenaires de coopération. Ainsi, l'Unité de Production Forestière (UPF) gère les forêts proches de Bamako et en particulier la forêt de la Faya (cf. Annexe 1). La forêt de la Faya peut être assimilée à une forêt claire. Le domaine classé représente 8,6 % du territoire Malien. Dans beaucoup de régions il constitue la seule réserve de bois. Il est très souvent utilisé de manière illicite [4]. Le couvert forestier dans cette zone est supérieur à 80 % [5].

Toutes les savanes se caractérisent par la présence obligatoire d'un tapis herbacé qui, quand il est développé, domine la physionomie de la formation. Au-dessus de celui-ci se trouve une strate ligneuse plus ou moins lâche formée d'arbres ou d'arbustes de petite ou moyenne taille.

Les savanes vergers sont des formations fortement influencées par l'Homme via une mise en culture longue ou par une succession de mise en jachère et de mise en culture [4]. Ce sont des grands espaces de champs parsemés d'arbres répartis de manière régulière dans l'espace (cf. Annexe 3). Les arbres restant sur la zone sont conservés lors des défrichements car ils sont considérés comme « utiles », ce qui explique qu'à la longue ils soient les seuls arbres présents. Elles se caractérisent donc par un appauvrissement de la diversité spécifique des ligneux et par l'apparition de nombreuses graminées rudérales et d'espèces pionnières [4]. Les espèces forestières dominantes y sont le *Vitelerria paradoxa* (Karité), *Parkia biglobosa* (Néré) et *Faidherbia albida*. Dans ces zones, la densité ligneuse est inférieure à 25 m<sup>3</sup>/ha. Le couvert forestier y est proche de 20 % [5]. Ces zones de savanes vergers sont généralement situées dans les plaines et à distance raisonnable des villages. Elles doivent être accessibles à pieds depuis les habitats.

Les zones de savane arbustives sont bien souvent des anciens champs laissés en jachère (cf. Annexe 2). Ce sont des formations herbeuses dont la strate ligneuse est composée essentiellement de nanophanérophytes dont la hauteur maximale est inférieure à 7 m et le

volume ligneux inférieur à 20 m<sup>3</sup>/ha [4]. Le couvert forestier y est compris entre 40 et 60 % [5].

Le terme bowal (pluriel bowé) vient du Peul foula du Fouta Djallon, où il désigne un plateau semi-désertique, fossilisé par une cuirasse affleurante. Par extension, ce nom a été donné aux zones dépourvues ou presque de végétation pendant la saison sèche et parsemées de termitières « champignons ». Ces formations couvrent une surface importante et se différencient par endroit en une formation végétale originale à laquelle est souvent donnée le nom de brousse tachetée (cf. Annexe 4). Dans la région d'étude, les bowé sont de type arboré. Ils sont très facilement reconnaissables sur des images aériennes car c'est une mosaïque de bowé purs dépourvus de ligneux et de taches arborées très denses. Les espèces dominantes dans cette formation sont : *Combretum micranthum*, *Acacia macrostachya*, *Pterocarpus erinaceus* et *Bombax costatum* [4]. Sur ces formations, le volume ligneux est supérieur à 20 m<sup>3</sup>/ha et peut atteindre les 45 m<sup>3</sup>/ha. Le couvert forestier y est compris entre 40 et 60 % [5].

La Figure 2 montre des extraits de la composition colorée SPOT 5 pour les quatre grands types de formations végétales sur la zone d'étude. Les flèches indiquent ce qui est considéré comme forêt et ce qui est considéré comme sol. Ces vignettes permettent d'appréhender les différentes formations végétales « vu de l'espace ».

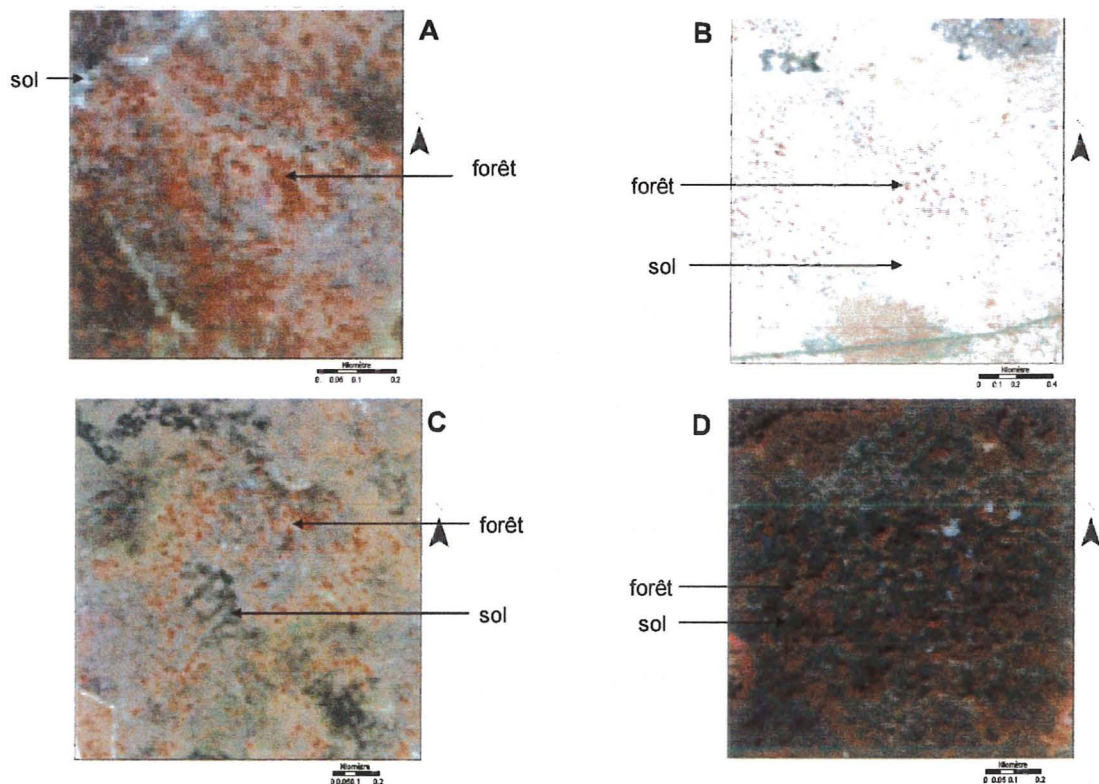
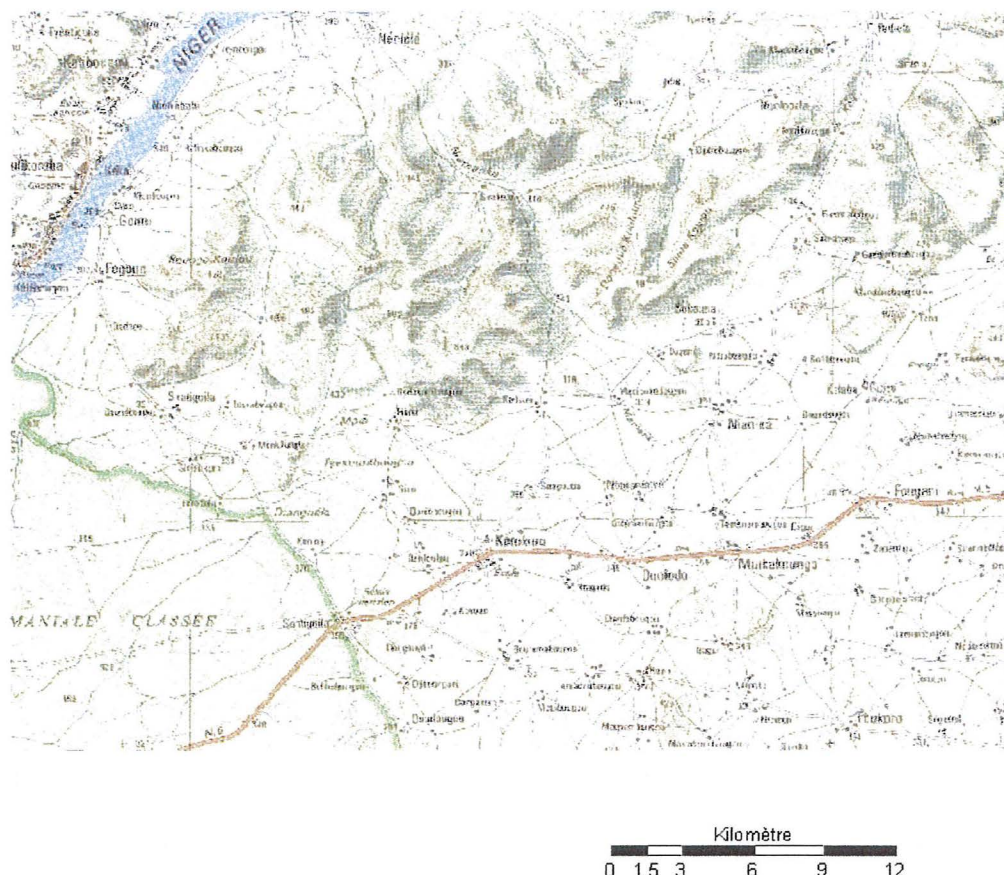


Figure 2: Extraits de l'image multispectrale SPOT 5 montrant chacune un des types de formations végétales. A : Forêt classée, B : savane verger, C : savane arbustive et D : bowé





**Figure 3: Carte IGN de la zone d'étude.**

Sur cette carte IGN de la zone d'étude, la forêt classée de la FAYA se trouve dans le coin sud-ouest. Les zones de bowé sont plutôt dans le nord et les zones de savanes vergers et de savanes arbustives sont surtout dans le coin sud-est.

### **3. Nécessité d'assurer un suivi de la ressource ligneuse au Mali**

Le déboisement est à la deuxième place des problématiques environnementales les plus préoccupantes pour le 21<sup>ème</sup> siècle, juste après les changements climatiques et avant les processus de désertification. La déforestation se pose avec acuité dans les pays en voie de développement [1].

Plusieurs raisons sont à l'origine de cette déforestation. La concurrence foncière entre l'agriculture, la forêt et la ville est une de ces raisons. L'augmentation constante de la population pousse les agriculteurs à défricher de plus en plus de surface pour subvenir aux besoins alimentaires de la population sans cesse plus nombreuse. Une autre raison de la déforestation est l'augmentation constante de l'exploitation de la forêt par l'Homme. De plus, dans les systèmes traditionnels d'exploitation agricole, les enjeux de la conservation du patrimoine forestier dépassent largement le cadre de la crise énergétique liée aux ressources ligneuses. La dégradation des formations ligneuses se traduit en outre en termes de dégradation des sols, d'accélération du cycle de l'eau et de modifications sensibles des conditions de production [6].

Avant 1960, l'offre en bois de feu était supérieure à la demande. Mais après la période de sécheresse des années 1960, les pays d'Afrique ont connu un exode rural important. L'augmentation de la population urbaine, estimée à 60 % durant ces quarante dernières années [7], a créé une forte augmentation des besoins urbains en bois énergie. Ceci a mené à la création d'un véritable secteur d'activité destiné à alimenter en bois les centres urbains. Au Mali, ce secteur d'activité est tellement important qu'il est devenu la deuxième activité des paysans après l'agriculture elle-même [7]. Au Mali, 90 % de l'énergie sont fournis par le bois. La sécheresse a également entraîné une forte baisse des rendements des cultures et donc une surexploitation indirecte des ligneux pour nourrir les animaux du fait du manque de fourrage [8].

La demande urbaine en bois de feu est en constante augmentation, +1,6 % par an pour le bois de feu et +4,1 % pour le charbon de bois [9]. Ces chiffres montrent que la consommation de bois énergie augmente mais ils montrent aussi que le charbon est plus à la mode que le bois de feu. Le charbon est moins encombrant et a un pouvoir calorifique supérieur. Il est donc plus pratique pour un usage domestique citadin. Cependant, il faut 4 à 7 kg de bois pour faire 1 kg de charbon alors que son pouvoir calorifique n'est que deux fois supérieur à celui du bois. L'utilisation du charbon comme source d'énergie augmente donc, en théorie, la consommation de bois d'un facteur de l'ordre de deux à trois.

Entre 1980 et 1995, l'étendue des forêts à l'échelle mondiale a diminué de 180 millions d'hectare [7]. Au Mali, on estime que la disparition de la forêt se fait au rythme de 600 000 hectares par an et moins de 1 % de ce bois est contrôlé par les services forestiers [10].

Face à cette surexploitation et à la disparition progressive de la ressource ligneuse dans les pays d'Afrique, apparaît la nécessité de mettre en place un véritable suivi des forêts. Ce suivi n'est pas forcément évident à mettre en place dans des pays qui ont peu de moyens à allouer à la surveillance et au recensement des ressources. Beaucoup d'études sont menées sur la base de données erronées, partielles et souvent très anciennes [7].

Il existe donc un réel besoin dans les pays d'Afrique, et au Mali plus précisément, d'avoir un outil d'estimation, peu onéreux et fiable, de la ressource ligneuse et de son évolution.



## **Partie 2. Bilan de l'existant et Problématique**

Cette partie du mémoire fait le bilan des contraintes à prendre en compte et des travaux déjà réalisés sur les problématiques de suivi de la ressource ligneuse. Les données MODIS sont présentées dans cette partie ainsi que les différents travaux mis en place à partir et sur ces données.

### **1. Mise en place d'une solution technique aux problèmes d'évaluation et de suivi du couvert forestier malien**

#### **1.1. Facteurs à prendre en compte**

Pour répondre à la problématique du suivi spatial et temporel de la ressource ligneuse au Mali, plusieurs critères sont à prendre en compte.

Tout d'abord, il faut envisager une solution à faible coût. Le budget alloué par les pouvoirs publics maliens à ce type de projet ne permet pas de mettre en place des solutions onéreuses.

Ensuite, la solution mise en place doit être robuste et simple. Il faut que la méthode de suivi de la ressource ligneuse mise en place soit fiable, précise et durable dans le temps.

Enfin, il faut que cette méthode puisse être mise en oeuvre à un pas de temps régulier, pour avoir une idée de l'évolution de la ressource dans l'espace et dans le temps.

#### **1.2. Bilan de l'existant en matière de détection du couvert forestier**

##### ***Méthode de terrain***

Il existe de nombreuses techniques différentes d'évaluation du couvert forestier. La première, la plus ancestrale, est l'inventaire forestier. C'est une technique fiable et robuste mais cette technique est très fastidieuse. Elle demande énormément de temps, ce qui la rend très onéreuse lorsqu'il s'agit d'assurer le suivi de la ressource ligneuse sur une vaste zone.

##### ***Méthodes basées sur l'analyse d'image***

Les autres méthodes sont toutes des méthodes basées sur l'utilisation d'images satellites ou aériennes. Il existe plusieurs types d'images satellites qui ont tous des résolutions spatiales et temporelles différentes. Le tableau 1 donne des exemples des différentes résolutions possibles ainsi que le prix au km<sup>2</sup> de ces images.



Type d'image	Résolution de l'image Multispectrale	Résolution de l'image Panchromatique	Prix au km <sup>2</sup> des images d'archive
MODIS	500 m		0 €
LANDSAT	30 m	15 m	0,014 €
SPOT 5	10 m	5 m	0,75 €
IKONOS	4 m	1 m	11,776 €
QUICKBIRD	2,44 m	61 cm	11,776 €

**Tableau 1: Exemples d'images satellitales disponibles, de leur résolution et de leur prix (image d'archive)**

A partir des images satellites, il existe plusieurs méthodes pour évaluer le couvert forestier.

La première, est la réalisation d'une interprétation manuelle d'image aérienne ou d'image satellite à très haute résolution (IKONOS par exemple). Il suffit de comparer visuellement l'image à des grilles donnant une idée de la densité du couvert forestier [11]. Cette solution n'est pas applicable à notre problème car les images à très hautes résolutions sont encore trop onéreuses pour que les pays africains puissent assurer le suivi de leurs ressources avec. De plus ces méthodes dites manuelles sont très subjectives puisque dépendantes du jugement d'un opérateur et elles sont extrêmement coûteuses en temps de travail.

La méthode des grilles de points [11] est facile, rapide et précise. L'observateur superpose une grille de points à l'image et compte le nombre de points qui tombent sur un arbre. Le rapport du nombre de points « arbre » sur le nombre de points total donne le pourcentage de couvert forestier. La grille de points peut être régulière ou aléatoire. Il est possible de faire le même genre de travail avec un transect au lieu d'une grille de points. Le défaut de cette méthode est qu'elle est complètement manuelle et donc longue à mettre en place. Comme la technique précédente, elle est aussi subjective.

Il reste alors l'utilisation de méthodes automatisées sur des images à moyenne voir faible résolution. Il existe de nombreuses méthodes automatiques ou semi-automatiques de détection des arbres.

### **Méthodes utilisant des indices de végétations**

L'utilisation d'indices reste une des méthodes les plus utilisées. Il existe de multiples indices qui ont tous une utilité particulière et qui sont tous plus ou moins efficaces selon les conditions de la zone d'étude (nature du sol, type de végétation,...). Certains indices sont toutefois plus généraux que les autres.

La littérature regorge d'indices de végétation. Les auteurs exploitent le plus souvent le fait que la végétation a une absorption maximum dans le rouge (entre 0,45 et 0,65µm) pour la photosynthèse et qu'elle réfléchit une importante quantité d'énergie dans la partie proche infrarouge du spectre.

Le NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) reste l'indice le plus communément utilisé en télédétection. Sa formule est la suivante :  $NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$  ([12]) où NIR sont les valeurs de la bande infrarouge et R les valeurs de la bande rouge. Le NDVI peut être utilisé sur tout type d'image. Il est applicable à n'importe quelle résolution mais il donne des résultats variables suivant la résolution de l'image.

Le problème de toutes les méthodes précédemment citées est qu'elles demandent toutes l'achat d'images plus ou moins onéreuses, suivi d'un traitement relativement complexe avant de donner une carte du couvert forestier.

Il existe aujourd'hui des produits qui donnent directement ce pourcentage de couvert forestier à l'échelle planétaire. MODIS est un de ces produits. Il donne, à un pas de 500 m sur l'Afrique et à un pas de 250 m sur l'Amérique du Nord, le pourcentage de couvert. L'avantage de ses données MODIS, créées et fournies par la NASA est que ce sont des données de très faible coût.

La solution idéale pour répondre à notre problème serait donc actuellement le produit MODIS VCF donnant les pourcentages de couvert forestier à un pas de 500 m. Dans le cadre du suivi de la ressource ligneuse au Mali, il ne s'agit pas de positionner de manière précise les arbres, mais plus d'avoir une idée de la quantité de couvert forestier et de son évolution. De plus, ce produit a le gros avantage d'être mis à disposition gratuitement est d'être calculé une fois par an. L'étude des cartes MODIS en pourcentage de couvert forestier à différentes dates pourrait donner un aperçu de la baisse ou de la hausse du couvert forestier dans des zones de 500 m sur 500 m. Ainsi, la comparaison des cartes MODIS entre elles pourrait permettre de mettre en évidence l'évolution du couvert forestier. Encore faut il savoir si ce produit est fiable et robuste.

C'est dans cette optique que le CIRAD a décidé de me prendre en stage afin de mettre en place une vérification de la qualité et de la fiabilité des cartes MODIS grâce à des images à plus haute résolution produites par le satellite Spot 5 et un travail de vérité terrain.

## **2. Les données MODIS**

La disponibilité gratuite des produits générés par la NASA via le capteur MODIS fait qu'ils promettent de devenir une source d'information importante pour les futures déterminations du couvert et la gestion opérationnelle à l'échelle régionale ou globale [13].

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un capteur embarqué sur la plateforme d'observation de la terre TERRA.

Le satellite TERRA a débuté l'acquisition d'image le 24 février 2000. Son orbite est à 705 km de la Terre.

MODIS est un capteur satellite qui acquiert 30 bandes spectrales dont 7 spécialement choisies pour percevoir les caractéristiques de la végétation. Le tableau ci-dessous récapitule ces bandes spectrales.



N° de la bande	Largeur spectrale en nm	Résolution spatiale en m
1 (Rouge)	620-670	250
2 (Proche infrarouge)	841-876	250
3 (bleu)	459-479	500
4 (vert)	545-565	500
5	1230-1250	500
6	1628-1652	500
7(infrarouge lointain)	2105-2155	500

**Tableau 2 : Bandes spectrales acquises par MODIS [14]**

La NASA utilise un algorithme spécial pour traiter les données acquises par le capteur. C'est le Modis Land Cover Classification Algorithm (MLCCA). Cette chaîne de traitement nécessite deux années de données pour pouvoir fonctionner. Il s'appuie sur une base de données d'occupation du sol qui donne des exemples de chaque type d'occupation du sol.

MODIS utilise la classification IGBP mise en place par l'International Geosphere-Biosphere Program Data and Information System. Cette classification est composée de 17 classes d'occupation du sol.

Il s'appuie aussi sur le System for Terrestrial Ecosystem Parametrization (STEP) qui produit une classification, disponible gratuitement, sur 1373 sites de références, choisis par des experts.

Le MLCCA se base sur la technique statistique du « Boosting » et de la classification supervisée.

Il est difficile de se procurer des informations plus précises sur la nature du MLCCA. C'est pourquoi il semble intéressant d'étudier la pertinence des indices MODIS et d'en tester la fiabilité.

Les cartes MODIS possèdent un système de géoréférencement qui leur est propre l'Integerized Sinusoïdal projection.

A partir des données acquises par le satellite, la NASA produit une carte mondiale du pourcentage de couvert forestier. Cette carte est à une résolution de 500 m. Ce produit s'appelle MODIS Vegetation Continuous Field (VCF). Il est créé par intégration des valeurs de NDVI sur un an. Les pixels sont codés sur 8 bits de la manière suivante : de 0 à 100 c'est le pourcentage de couvert, 253 pour les pixels eau et 255 pour les valeurs nulles (données manquantes) [15].

### **3. Bilan des travaux existants sur les différents produits MODIS**

Depuis 2000 et le lancement des satellites Terra avec à son bord le capteur MODIS, beaucoup d'articles ont été publiés sur les capacités du capteur et ses utilisations possibles.

Fischer et Mustard (2007) ont évalué la pertinence des cartes de NDVI produites par MODIS en les comparant avec celles données par LANDSAT [16]. Ils ont montré un haut degré de corrélation entre les deux produits. Cette étude a été menée sur le continent américain et non pas sur le continent africain. Elle a donc été réalisée avec des cartes à 250 m de résolution.

D'autres études ont évalué la qualité des produits MODIS en les comparant avec des images à très hautes résolutions IKONOS. Il ressort de ces comparaisons que les indices de végétations, d'occupation du sol [17] et les données sur le « Leaf Area Index » (LAI) [18] sont très corrélés aux résultats obtenus à partir du traitement des images IKONOS.

Hayes D. et al ont même testé l'utilité des différents indices MODIS dans la détermination de l'évolution de l'occupation du sol dans les régions tropicales [19].

Des travaux ont été menés pour mettre en place des cartes d'occupations des sols à partir des données MODIS [20] avec succès et pour faire une évaluation du couvert forestier [21].

Cependant, une étude a été menée sur la zone sud ouest américaine pour vérifier les taux de couvert forestier MODIS VCF. White et al [22] ont comparé les valeurs VCF à des données de deux inventaires forestiers sur la région du Colorado, de l'Arizona et de l'Utah. Les auteurs n'ont utilisé que les zones de forêt. Ils ont supprimé les zones où le couvert forestier est nul. Il est apparu qu'il existe un biais systématique entre les données VCF MODIS et celles des inventaires. Les données MODIS sous estiment le couvert forestier en moyenne de 20 %. Pour les valeurs de couvert forestier supérieures à 60 %, MODIS sous estime le couvert de 40 %. Ils ont aussi observé que le résidu (MODIS – valeur inventaire) augmente avec l'augmentation du couvert forestier. La classe de valeurs inférieures à 5 % de couvert forestier est deux fois plus fréquente avec MODIS qu'avec les données d'inventaire et au dessus de 20 % MODIS sous estime systématiquement les valeurs de couvert.

Ils ont émis l'hypothèse que ces différences de pourcentage de couvert étaient liées à la résolution du capteur. Pour vérifier cette hypothèse, ils ont agrégé des données de NDVI LANDSAT à différentes résolutions pour voir la relation avec les données de terrain. Cette manipulation met en évidence que la relation entre NDVI et couvert forestier est de plus en plus biaisée avec l'augmentation de la résolution. *diminuer*

Ils en concluent donc que les données MODIS VCF au pas de 500 m ne sont pas utilisables sur la zone Sud des États Unis.

Une étude du même type a été menée par Disney et al [23] sur les forêts du Royaume Uni. Comme précédemment, ils ont comparé les données VCF MODIS à des données d'inventaire forestier. Sur cette zone ils estiment que MODIS surévalue la forêt d'un facteur de l'ordre de 2 (93 %)

Il semble donc au vu de ces deux dernières études que la qualité de MODIS VCF ne soit pas la même sur toutes les zones du globe. Elles sous estiment la forêt dans la zone sud des États Unis et elles la surestiment au Royaume Uni. Il est donc intéressant de se poser la question de la fiabilité des données VCF MODIS sur le secteur du Mali. Savoir si elles sous-estiment le couvert forestier ou si elles le surestiment et avoir une idée du biais éventuel sur la zone.



## **Partie 3. Matériels et méthodes**

Cette troisième partie présente les choix méthodologiques et matériels qui ont été adoptés pour répondre à la problématique de l'étude. Dans un premier temps, la méthodologie générale est présentée en donnant rapidement l'enchaînement des différents traitements mis en place. Une deuxième partie présente le choix des images utilisées (date d'acquisition, résolution,...). Enfin, la troisième partie détaille un peu plus le traitement des données.

### **1. Méthodologie générale**

Nous ne disposons pas au Mali d'inventaires forestiers couvrant des zones suffisamment grandes pour envisager les utiliser directement pour une validation des données MODIS.

Pour pouvoir évaluer VCF MODIS, nous avons donc choisi de le comparer à une image satellite ou une photographie aérienne qui constituera la carte de référence du couvert forestier.

Pour créer cette carte il va falloir se baser sur une image satellite de la zone d'étude dont la résolution, la date d'acquisition et les longueurs d'ondes seront les mieux adaptés à la détection du couvert forestier.

#### **1.1. Calcul du taux de couvert**

Après avoir choisi et acquis cette image, il va falloir obtenir une carte de couvert forestier. Il nous faudra donc créer une carte classifiée en forêt/non forêt. Il va falloir choisir une technique de classification adaptée au problème.

Ensuite, il va falloir agréger la carte de référence à un pas de 500 m. Il faudra aussi veiller à ce que les deux cartes à 500 m soient bien calées entre elles pour être sûr de comparer les mêmes zones de terrain. Cette étape va être déterminante pour avoir une bonne estimation de la qualité des données VCF MODIS.

#### **1.2. Comparaison carte de référence/carte MODIS**

Il faudra ensuite, faire une étude statistique entre nos deux cartes pour évaluer la précision de l'image VCF MODIS. Pour cela il suffira de mettre en place des matrices de confusions entre la carte de référence et les données MODIS en comparant chaque pixel de la zone d'étude.

## **2. Le Choix des images satellites**

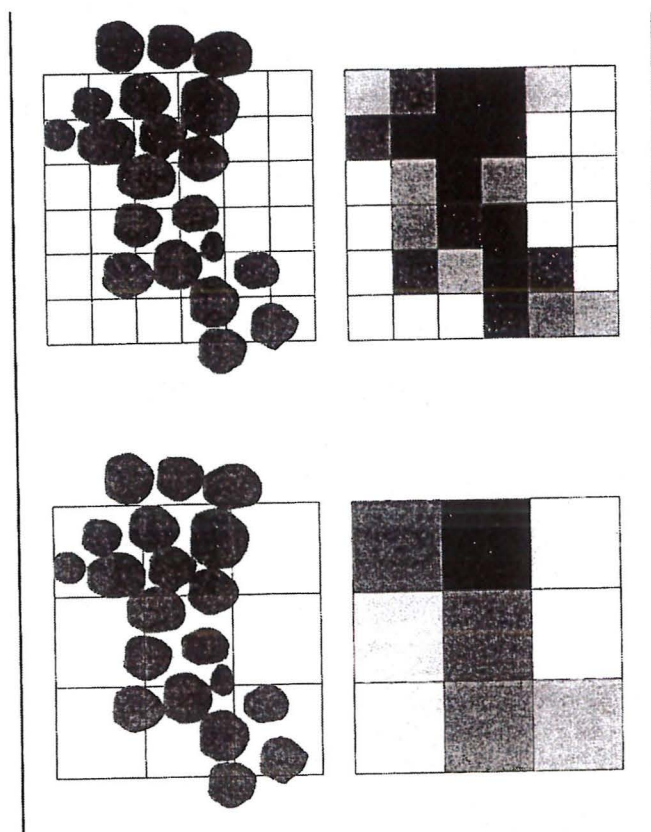
### **2.1. La résolution des images**

Un des gros problèmes en analyse d'image est d'adapter la résolution de ces images à la problématique. La résolution spatiale représente la taille du point élémentaire au sol perçu à la verticale du satellite. Comme la taille des éléments qui constituent l'état de surface du sol est plus fine que celle du pixel des satellites actuels, c'est la combinaison des états de surface qui influencera la réflectance [24].

Dans la Figure 4, il est mis en évidence que selon la résolution, l'image obtenue est différente. Avec la résolution la plus fine, la forêt est encore bien restituée en recouvrement et forme.



Avec la résolution 4 fois supérieure à la taille moyenne des couronnes, les pixels mixtes sont largement influencés par la réflectance du sol ce qui entraîne un élargissement apparent de la bande végétale et un lissage des variations de recouvrement.



**Figure 4: Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une bande isolée**  
[Fonctionnement et gestion]

Lors de mon stage je suis parti en mission au Mali avec une technicienne du CIRAD pour reconnaître la zone d'étude, me familiariser avec la végétation et effectuer des vérités terrain sur chacune des grandes formations végétales.

Nous avons notamment, assisté par un ingénieur forestier malien, relevé à l'aide d'un GPS les limites des bowé sur des transects définis sur plusieurs plateaux de la zone.

Il ressort de ce travail de terrain que :

- sur les plateaux, les taches de ligneux et les zones de sols nus sont pour la grande majorité de taille supérieure à 10 m de rayon. Les différentes zones des plateaux seront donc bien discernables à des résolutions de 5 ou 10 m.
- la forêt de la Faya est une forêt claire encore assez dense. Elle présente des clairières herbacées relativement grandes parfaitement détectables à la résolution de 10 m.
- dans les zones de parc verger, les arbres qui y sont implantés sont de gros arbres adultes espacés en moyenne de 20 m. Ils sont donc eux aussi tout a fait visible à une résolution de 10 m.

La Figure 5 montre que la dégradation de la résolution spatiale entraîne une perte d'information. Cependant, la résolution à 10 m permet encore de bien appréhender la brousse

tigrée [24]. La savane arbustive étant du même type que la brousse tigrée, une résolution de 10 m suffit à caractériser l'essentiel de ses caractéristiques.

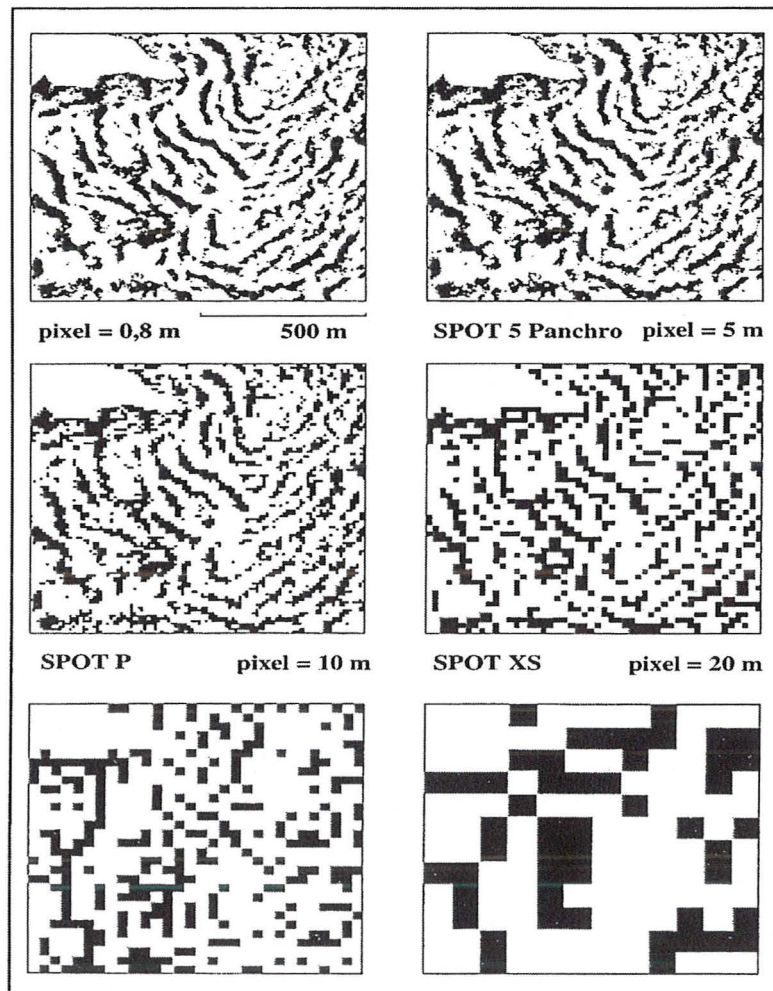


Figure 5: Influence de la taille du pixel sur la perception aérienne d'une structure de brousse tigrée[24]

Les images Spot 5 à 10 m de résolution sont donc adaptées à cette étude car elles permettent de caractériser la ressource ligneuse dans les quatre différentes formations végétales présentes dans la zone.

## 2.2. Le choix des dates d'acquisition des images

L'étude vise à mettre en évidence les ressources ligneuses. Il s'agit donc de caractériser les arbres sans prendre en compte la végétation herbacée, « agricole » ou naturelle. Il faut donc choisir une date d'acquisition de l'image pour laquelle les cultures auront été récoltées et les herbacées ne seront pas trop présentes. Il faut aussi choisir une date pour laquelle les arbres seront encore le plus vert possible pour qu'ils soient plus facilement visible dans les images.



Au Mali le cycle des herbacées est calé sur la saison des pluies. Les herbacées repoussent au début de la saison des pluies et disparaissent à la fin de celle-ci. Il faut donc choisir une image acquise en fin de saison des pluies (c'est à dire après novembre).

### **2.3. Les scènes disponibles**

Nous avons donc choisi d'utiliser pour créer notre image de référence une image satellite SPOT 5.

Dans le cadre de l'étude, le CIRAD n'a pas les moyens de commander l'acquisition d'une scène SPOT 5 de la zone d'étude. Une image d'archive a donc été achetée. L'image d'archive qui correspondait le plus à nos critères de sélection est une image datant de 2004.

La zone décrite dans la première partie a été choisie car c'est une zone que connaît très bien le CIRAD et où beaucoup d'autres projets ont lieu. J'ai été sur cette zone en mai 2007 pour assister une technicienne du CIRAD dans une mission d'évaluation de la surface des bowé sur les plateaux dans la zone. Cette mission consistait à relever à l'aide d'un GPS les limites des bowé sur des transects définis, sur plusieurs plateaux de la zone.

J'ai donc choisi cette zone car j'ai pu y faire une mission de reconnaissance de végétation qui me sera utile dans la suite de l'étude et qui m'aide à avoir une connaissance de terrain des formations végétales de la zone d'étude.

Initialement, il était prévu de disposer de données MODIS de la zone datant de 2004. Cependant, il semblerait qu'il y ait des problèmes sur les produits MODIS VCF collection 4, dont fait partie l'année 2004, et elles ont donc été retirées au téléchargement. La carte VCF la plus récente que j'ai pu récupérer est celle de 2001.

Ceci pose un problème important dans cette étude. En effet je dispose d'image SPOT 5 de 2004 et de données MODIS de 2001. Lors de la comparaison des résultats donnés par ces deux produits, il va falloir rester conscient du décalage temporel de trois ans. Ainsi, je vais mettre en place une démarche de comparaison entre mes résultats obtenus via les données SPOT et MODIS mais il faudra remettre en oeuvre cette démarche quand les cartes MODIS de 2004 seront à nouveau disponibles au téléchargement.

### **2.4. Les images SPOT 5**

Les images SPOT 5 à 5 m et 10 m de résolution sont adaptées à cette étude car elles permettent de détecter la végétation ligneuse dans les quatre différentes formations végétales présentes dans la zone.

Je dispose pour cette étude de deux types d'image SPOT 5, une image panchromatique et une image multispectrale.

L'image panchromatique est à une résolution de 5 m. Sa date d'acquisition est le 25 février 2004 à 11 h 23 mn. Cette image ne contient qu'une seule bande. La bande spectrale, sur laquelle sont réalisées les mesures, s'étend sur tout le spectre du visible de 0,48 à 0,71  $\mu\text{m}$  [25].

L'image multispectrale est à une résolution de 10m, sauf pour la bande 4 qui est à une résolution de 20 m. Sa date d'acquisition est le 28 décembre 2004 à 11 h 19 mn. Cette image contient 4 bandes. La bande 1 dans le vert entre 0,5 à 0,59  $\mu\text{m}$ . La bande 2 dans le rouge entre 0,61 à 0,68  $\mu\text{m}$ . La bande 3 dans le proche infrarouge (PIR) entre 0,78 à 1,75  $\mu\text{m}$ . Et enfin la bande 4 dans le moyen infrarouge (MIR) entre 1,58 et 1,75  $\mu\text{m}$  [25]. À la livraison, les bandes



1 et 3 sont inversées dans le fichier TIFF. Ceci est dû à la convention d'affichage RGB qui affiche le proche infrarouge en rouge, le rouge en vert et le vert en bleu.

	Largeur spectrale en nm	Résolution en m
Vert	500-590	10
Rouge	610-680	10
Infrarouge	790-890	10
Moyen Infrarouge	1580-1750	20
Panchromatique	510-730	5

**Tableau 3: Tableau récapitulatif des largeurs spectrales et de la résolution spatiales des bandes acquises par SPOT 5 [26].**

La matrice de corrélation entre les quatre bandes de l'image Spot 5 multicanaux, montre que, sur notre zone d'étude, les bandes 2 (rouge) et 3 (vert) sont corrélées. Le panchromatique est peu corrélé avec les autres canaux. Il semble donc intéressant de le prendre en compte dans l'étude. Les quatre bandes ne sont en tous les cas que très faiblement décorrelées. L'information contenue dans l'image n'est donc pas de très bonne qualité. Les canaux sont corrélés entre eux et sont donc porteurs d'une information presque similaire. Au vu du petit nombre de bandes disponibles, je vais essayer de me servir de toutes les bandes lors de mes traitements hormis la bande 4 qui n'a pas grand intérêt.

	Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Panchromatique
Bande 1	1	0.86	0.82	-0,04	0,68
Bande 2	0.86	1	0.97	-0,05	0,76
Bande 3	0.82	0.97	1	-0,05	0,79
Bande 4	-0,04	-0,05	-0,05	1	-0,07
Panchromatique	0,68	0,77	0,79	-0,067	1

**Tableau 4 : Matrice de corrélation, issue d'une ACP réalisée sous le logiciel IDRISI, entre les bandes de l'image Spot 5 multicanaux et le canal panchromatique sur la zone d'étude.**

## 2.5. Vérification du géoréférencement des données

Pour pouvoir comparer le résultat de l'analyse des images SPOT aux données MODIS, il faut être sûr que les données soient bien calées entre elles.

Comme je ne prépare pas une mission de terrain mais que je souhaite juste comparer des images entre elles, je ne suis pas obligé d'avoir des couches calées parfaitement dans l'absolu. Il suffit que mes données soient bien calées entre elles.

Pour vérifier l'adéquation des géoréférencements de mes données, j'ai utilisé une couche représentant les rivières dans la région d'étude. Cette couche est issue de l'interprétation d'une image LANDSAT orthorectifiée de 1999. Cette image constitue actuellement le support géographique le plus géométriquement correct de notre zone d'étude. Dans la zone d'étude, le fleuve Niger est relativement bien canalisé. Son tracé n'évolue donc pas.

La couche « rivière » sert de référence.

Les images Spot 5 sont bien calées alors que la carte MODIS est décalée de deux pixels vers le Nord par rapport aux rivières. J'ai donc recalé les données MODIS.

Il est à noter que cette manipulation me permet uniquement d'affirmer que mes couches sont bien calées à 500 m près (un pixel MODIS).

### **3. Méthodes mises en place**

#### **3.1. Postulats de travail**

Pour pouvoir évaluer les taux de couvert forestier à partir d'image Spot 5, il m'a fallu poser plusieurs postulats :

- Dans le cadre de l'étude, ce qui intéresse le CIRAD est de valider les données MODIS qui elles ne font aucune différence entre les différentes formes de ressources ligneuses. Il n'est donc pas nécessaire de décomposer la ressource ligneuse en plus de catégories. Je considère que l'occupation du sol se décompose en deux classes (forêt; sol). Il aurait été possible de faire plus de classes en décomposant les différents types de forêts présents sur la zone (brousse tachetée, forêt classée,...).
- Le deuxième postulat de travail que j'ai posé est que la zone couverte par un pixel est homogène. Les différents niveaux de couverture ne sont pas différenciés. Chaque pixel est couvert à 0 % ou à 100 % par la ressource ligneuse. Je suppose donc qu'il n'y a pas de « trou » dans les couronnes des arbres.

Ce choix se justifie par la taille du pixel choisi. Les formations ligneuses à interpréter ont toutes des diamètres supérieurs à 10 m. Au pas de 5 m elles sont donc totalement détectables. Néanmoins, des erreurs de classification dans un sens comme dans l'autre sont à attendre aux limites de ces formations. On fera néanmoins l'hypothèse qu'en agrégeant l'information « couvert » au pas de 500 m ces erreurs d'estimation se compenseront.

Nous n'avons a priori aucune raison de croire que cette méthode crée un biais systématique.

#### **3.2. Choix de quatre sites représentatifs des quatre types de formations végétales**

Afin de réaliser un échantillonnage le plus représentatif possible, j'ai décidé de détourner quatre sites représentatifs des quatre formations végétales citées dans la première partie de mon rapport. Dans ces quatre zones, j'ai créé des jeux de données tests et des jeux de données d'apprentissages. Les jeux de données ont été créés sous SIG par photo-interprétation de la composition colorée issue de l'image SPOT 5 multicanaux. J'obtiens ainsi pour chaque zone un ensemble de polygones de sol nu et de forêt.

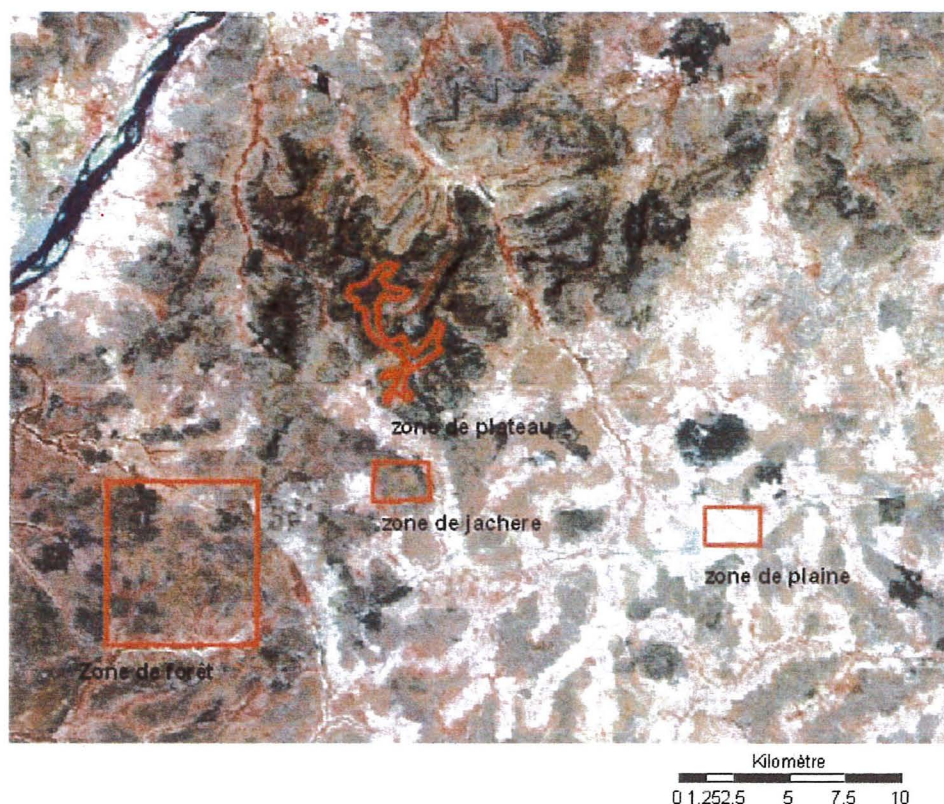
La zone de bowal que j'ai choisi couvre le plateau de Fiéna. Cette zone fait 577 ha.

La zone de savane verger est une zone rectangulaire de 2 500 m de long et de 1700 m de large ce qui représente une surface de 420 ha. Elle est située en bordure de la route reliant Bamako à Fana et est à proximité du village de Markagoungo.

La zone de forêt est un bout de la forêt classée de la Faya en bordure de Bamako. Elle mesure 7,3 km de long et 7 de large ce qui représente une surface de 5 000 ha.

Enfin, la zone de savane arbustive est située entre les villages de Korokoro et de Fiéna. Elle mesure 2,5 km de long et 1,7 km de large ce qui représente une surface de 440 ha.





**Figure 6: Composition colorée issue de l'image SPOT 5 multispectrale de la zone de travail avec les différents sites retenus pour la mise en place des bases d'apprentissage et de test**

### 3.3. Création de la carte de référence

Pour pouvoir évaluer les données VCF MODIS, il faut avoir une carte de référence à laquelle la comparer. Pour créer la carte vérité je me suis basé sur l'interprétation des images SPOT 5. À partir de ces images, il a fallu mettre en place un protocole de classification adapté à la zone et à l'étude.

La classification supervisée est plus appropriée dans ce cas que la classification non supervisée car je connais à priori le nombre de classes que je souhaite obtenir et leur position sur le terrain via la vérité terrain. Je souhaite obtenir deux classes. Une classe forêt qui est la classe d'intérêt dans cette étude et une classe que j'appellerai sol qui regroupe le sol et tout ce qui n'est pas forestier (eau, route, résidu d'herbacés...)

Je vais utiliser les trois premières bandes de l'image Spot 5 multicanaux (Vert, Rouge et Proche Infrarouge) et le canal panchromatique de l'image Spot 5 panchromatique. Le canal panchromatique est à une résolution de 5 m. Il n'apporte rien d'un point de vue spectral car sa bande d'acquisition est quasiment entièrement couverte par les autres bandes, mais il permet d'apporter une information plus fines au niveau spatial. De plus, comme l'a montré l'ACP effectuée précédemment, il est peu corrélé aux autres canaux. Il amène donc une information supplémentaire J'utilise aussi un néo canal, le NDVI qui a été calculé sur toute la zone d'étude.

Pour pouvoir utiliser ces 5 bandes, il m'a fallu les mettre à la même résolution. J'ai décidé de garder la résolution la plus fine (5 m) et de passer toutes les bandes à cette résolution. Pour



cela je me suis servi de la fonction EXPAND du logiciel IDRISI. Il suffit de rentrer un facteur d'expansion (ici : 2) et les pixels sont divisés en largeur et en longueur par ce facteur.

Mes données ne suivent pas une fonction statistique connue, il faut donc faire le choix d'une fonction non paramétrique [27]. Je ne connais pas de statistiques, à priori sur la fréquence des classes sols et végétation. Je ne peux donc pas appliquer la méthode du maximum de vraisemblance qui a pour but de se servir de la distance bayésienne (distance basée sur les probabilités d'apparition des classes).

J'ai choisi la classification supervisée par distance minimale qui est la plus efficace des méthodes de classification dans ce cas. La réponse du sol et de la forêt ne sont pas suffisamment différentes. En effet, les nuages de point « sol » et « forêt » se confondent en partie comme on le voit sur la Figure 7 qui donne la localisation des deux nuages dans l'espace 2D Rouge-Infrarouge.

Il apparaît sur la Figure 7 que les moyennes des deux catégories ne sont pas très différentes l'une de l'autre ce qui va rendre la classification de la carte difficile.

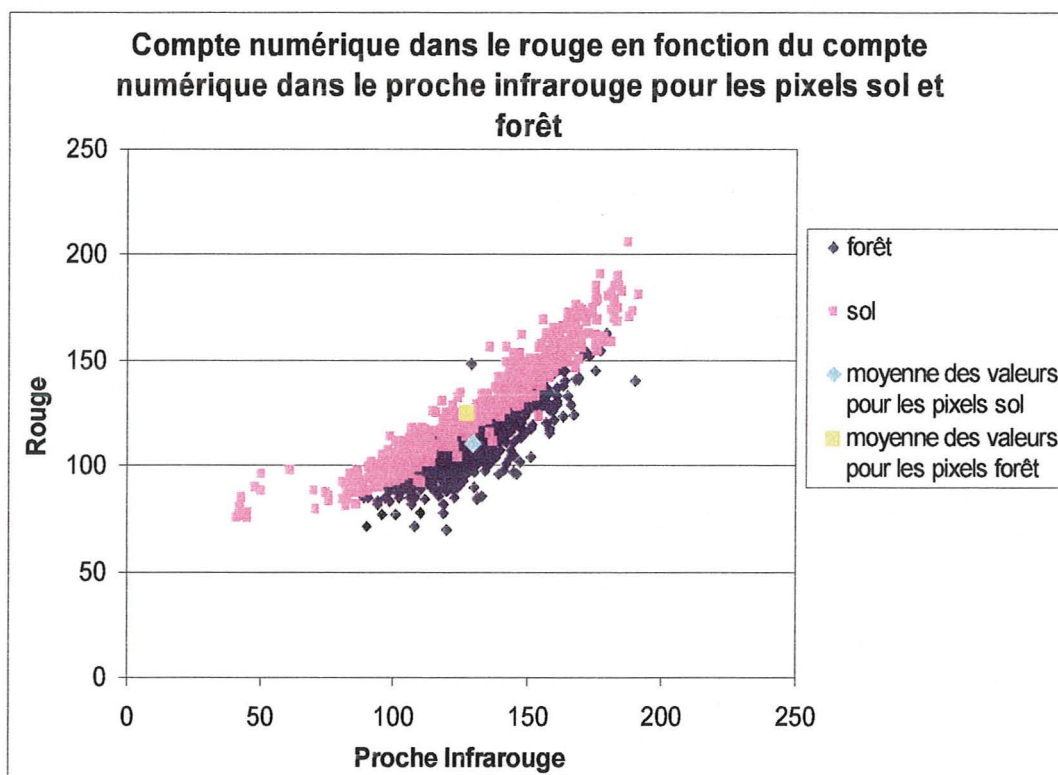


Figure 7: Compte numérique dans le rouge en fonction du compte numérique dans l'infrarouge pour 1 200 points placés régulièrement sur la zone et typés par photo-interprétation de l'image multicanal SPOT 5.

### 3.4. Évaluation de la qualité de la carte de référence

La qualité de la carte de référence est évaluée via un test stratifié. Un échantillon est créé dans chaque site représentant chacune une formation végétale. Ces échantillons vont me permettre d'évaluer la qualité de la représentation sur chacun des milieux. Les échantillons ont été créés sous ARCMAP et les tests sont effectués sous IDRISI via la fonction ERMAT qui crée des matrices de confusion à partir d'un fichier « vérité » et de la classification à évaluer.

Pour la taille des échantillons, il est nécessaire d'après Girard [28] de prendre un minimum de 30 pixels par classe. Pour mes tests, j'ai décidé de prendre des échantillons largement supérieurs à 30 pixels (cf. Annexe 5) pour être sûr d'avoir un test significatif.

### **3.5. Création d'une carte de référence en pourcentage de couvert forestier à 500m de résolution**

Une fois la carte de couvert forestier produite, il va falloir la dégrader pour pouvoir la comparer aux données MODIS à 500 m de résolution.

Sur la carte, dans des fenêtres de 100 pixels sur 100, je vais compter le nombre de pixels classés en forêt pour ensuite le ramener au nombre total de pixels dans la fenêtre (10 000) afin d'avoir un pourcentage de couvert forestier.

La difficulté principale de cette opération est de réussir à caler la fenêtre de 500 m sur les pixels MODIS. Il est important d'agréger les bons pixels entre eux pour avoir une concordance entre les deux cartes.

Pour caler mes fenêtres de 100 pixels sur les pixels MODIS, j'ai créé une grille grâce au greffon gratuit d'ARCMAP NPS GRID 1.1. J'ai créé une grille ayant le même nombre de colonnes et de lignes que la carte MODIS et calée sur ses pixels.

J'ai ensuite éliminé les carreaux de cette grille qui n'étaient pas totalement couverts par la carte de classification. Afin de ne prendre en compte que les pixels MODIS complètement couverts par les pixels classifiés.

J'ai aussi éliminé de la grille de découpage les pixels contenant de l'eau. Pour ce faire il m'a suffi d'utiliser le tracé de rivière, qui m'a servi à caler mes deux jeux de données, et éliminer les polygones de la grille qui l'intersectent. J'ai choisi de supprimer les pixels eau car ils sont codés 253 par MODIS VCF et ils auraient donc faussés l'analyse statistique. De plus, les pixels « eau » sont facilement identifiables et n'ont pas d'intérêts dans notre problématique.

## Partie 4. Résultats, Discussion

Cette partie présente les différents résultats obtenus lors de l'étude.

### 1. Création de la carte de référence

#### 1.1. Mise en place de l'échantillon d'apprentissage pour la classification supervisée.

Il y a deux types de sols dans la zone d'étude. Des sols très blancs et des sols très foncés. L'échantillon doit donc contenir des individus représentant de ses deux types de sols. C'est pour cela que l'échantillon d'apprentissage a été mis en place sur le plateau de Fiéna où les deux types de sols se côtoient.

L'échantillon d'apprentissage pour la classification supervisée comprend 15ha de forêt et 9ha de sol nu éclatés sur tout le plateau.

La figure ci dessous donne les caractéristiques spectrales des échantillons pour les cinq canaux pris en compte dans l'étude. Il apparaît qu'à l'exception du NDVI (5), chaque canal ne discrimine pratiquement pas les deux catégories.

Les nuages de points sol et forêt ne se distinguent que sur le néo-canal NDVI. Il joue donc bien son rôle de séparateur sol-forêt.

En revanche la moyenne des valeurs de compte numérique est différente pour le sol et la forêt pour nos 5 canaux.

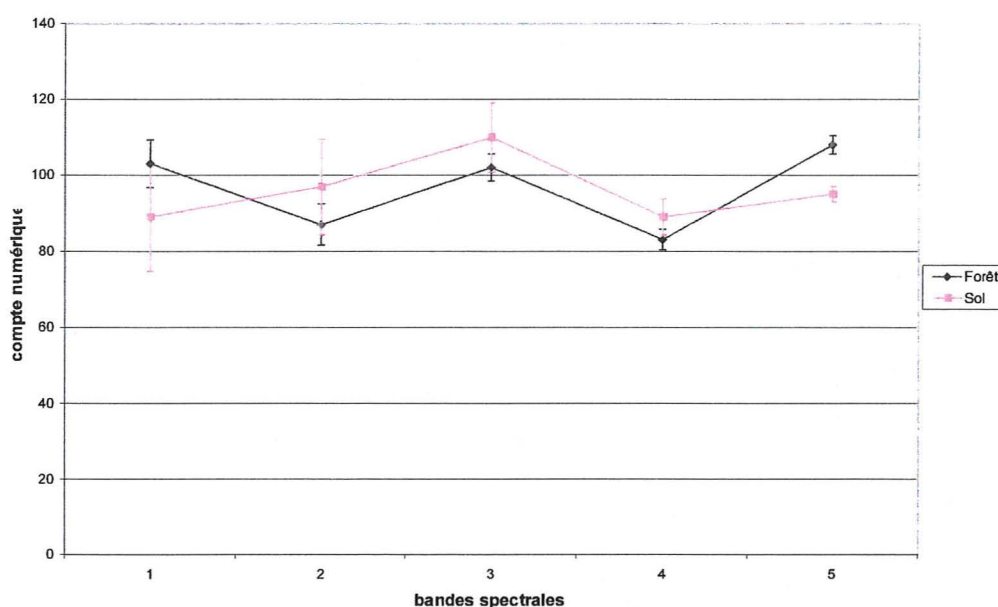
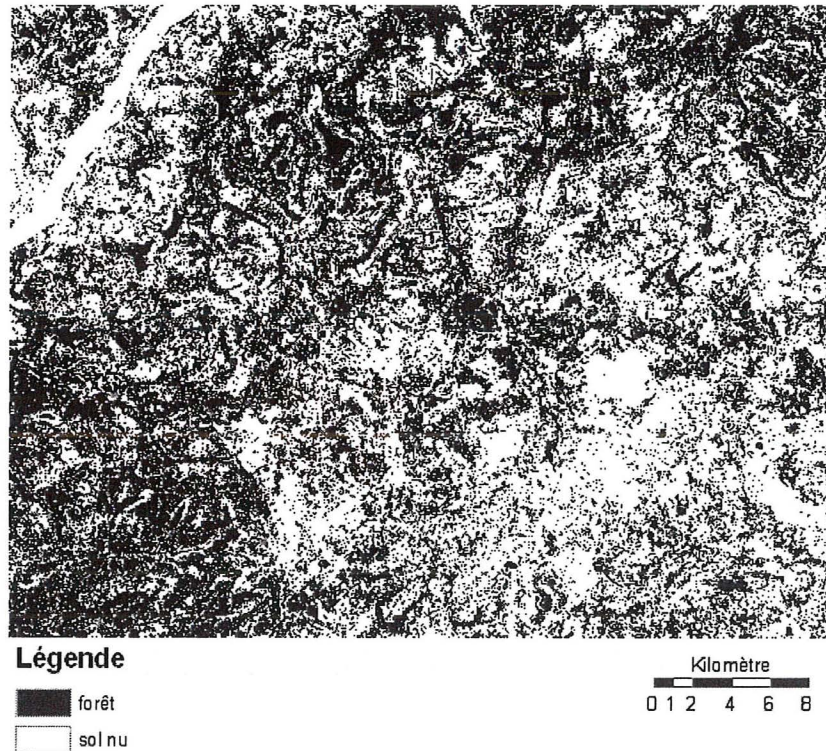


Figure 8: Moyenne et écart type de compte numérique du sol et de la forêt de mon échantillon d'apprentissage pour chaque canaux. En abscisse : les numéros de canaux avec dans l'ordre: l'infrarouge (1), le rouge (2), le vert (3), le panchromatique (4) et le NDVI (5). En ordonnée : compte numérique.



## 1.2. Mise en place de la classification supervisée

J'ai réalisé la classification supervisée avec le logiciel IDRISI. J'ai utilisé la fonction MINDIST qui réalise à partir d'un fichier de signature spectrale, réalisé à partir des données de l'échantillon d'apprentissage (cf. Figure 8), une classification supervisée sur la zone d'étude.



**Figure 9: Résultats de la classification supervisée par la méthode des distances minimales sur les 5 canaux.**

Le résultat de cette fonction est une classification en forêt/non forêt (Figure 9). Les pixels reconnus comme sol sont étiquetés avec la valeur 2 et ceux reconnus comme étant de la forêt sont étiquetés 1. Chaque pixel se voit attribuer la classe dont la moyenne est la plus proche de ses caractéristiques spectrales. Il ne reste plus qu'à tester la précision et la fiabilité de cette classification pour pouvoir juger de sa qualité et en faire la carte de référence.

## 1.3. Création de l'échantillon test

Pour mettre en place l'échantillon test, j'ai effectué exactement la même opération que pour l'échantillon d'apprentissage mais j'ai échantillonné les quatre zones définies dans la Partie 3. Cette échantillonnage dans les quatre grandes formations végétales va me permettre d'évaluer la qualité de la classification par type de milieu puis sur la totalité de la zone en étant le plus objectif possible.

#### 1.4. Évaluation de la qualité de la carte de référence

J'ai choisi d'évaluer ma classification sur chaque grand type de formation végétale avant de la tester sur l'ensemble de la zone.

##### *Évaluation des résultats sur la zone de savane verger.*

	Forêt	Sol nu	Total	Erreur d'omission (%)
<b>Forêt</b>	523	304	827	36,76
<b>Sol nu</b>	0	3 892	3 892	0
<b>Total</b>	523	4 196	4 719	
<b>Erreur d'excédent (%)</b>	0	7,24		6,44

**Tableau 5: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de savane verger (en ligne)**

Il n'y a pas de pixel sol nu classé en forêt. Tous les pixels classés forêt par la classification supervisée sont effectivement de la forêt. Par contre des pixels de forêt sont classés en sol nu. La classification sous estime donc la ressource ligneuse dans la zone de plaine. Soixante pour cent des pixels forêt sont bien classés. Alors que tous les pixels sol nu sont bien classés.

La classification est donc satisfaisante sur la zone de savane verger puisqu'elle ne surestime pas la part de couvert forestier mais qu'elle a plutôt tendance à la sous estimer. L'erreur totale de classification est de 6,5 %.

##### *Évaluation des résultats sur la zone de forêt classée*

	Forêt	Sol nu	Total	Erreur d'omission (%)
<b>Forêt</b>	15 751	14	15765	0,09
<b>Sol nu</b>	27	10 971	10 998	0,25
<b>Total</b>	15 778	10 998		
<b>Erreur d'excédent (%)</b>	0,17	0,13		0,15

**Tableau 6: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de forêt classée (en ligne)**

Sur la zone de forêt classée notre modèle est très précis il ne fait une erreur d'estimation que de 0,1 % ce qui est plus que suffisant pour l'utilisation qui doit en être fait.

L'erreur de classification des pixels de forêt est de l'ordre de 0,15 %. Ainsi le modèle est très précis sur la zone de forêt.



### **Évaluation des résultats sur la zone de savane arbustive**

	<b>Forêt</b>	<b>Sol nu</b>	<b>Total</b>	<b>Erreur d'omission (%)</b>
<b>Forêt</b>	2215	22	2237	0,98
<b>Sol nu</b>	0	573	573	0
<b>Total</b>	2215	595	2810	
<b>Erreur d'excédent (%)</b>	0	3,70		0,78

**Tableau 7: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de savane arbustive (en ligne)**

Dans la zone de savane arbustive, les résultats sont aussi très satisfaisants. En effet, le sol nu est très bien décrit par la classification. Aucun pixel de sol nu n'est classé en forêt. Par contre, quelques pixels de forêt sont classés en sol nu (1 %). Là encore, la classification sous estime le couvert forestier.

La classification sous estime donc de 1 % environ le couvert végétal dans la zone.

### **Évaluation des résultats sur la zone de bowé**

	<b>Forêt</b>	<b>Sol nu</b>	<b>Total</b>	<b>Erreur d'omission (%)</b>
<b>Forêt</b>	4861	63	4924	1,28
<b>Sol nu</b>	84	2425	2505	3,35
<b>Total</b>	4945	2488	7433	
<b>Erreur d'excédent (%)</b>	1,7	2,53		1,98

**Tableau 8: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur la zone de bowé (en ligne)**

Sur les bowé, la ressource ligneuse est bien appréhendée (1,3 % de pixels ligneux classés en sol nu). Seule 2 % des pixels prédits comme étant de la forêt sont, en réalité du sol nu. L'erreur globale de la classification est de 2 %.

Les bowé sont donc bien représentés par notre classification.

### **Évaluation générale**

	<b>Forêt</b>	<b>Sol nu</b>	<b>Total</b>	<b>Erreur d'omission (%)</b>
<b>Forêt</b>	23 350	403	23 753	1,7
<b>Sol nu</b>	111	17 861	17 972	0,62
<b>Total</b>	23 461	18 264	41 725	
<b>Erreur d'excédent (%)</b>	0,47	2,21		1,23

**Tableau 9: Matrice de confusion entre les valeurs de la classification (en colonne) et l'échantillon test sur toute la zone d'étude (en ligne)**

En rassemblant tous les échantillons tests en un seul jeu de données, j'ai testé la qualité de la classification sur toute la scène. Le Tableau 9 donne les résultats de la matrice de confusion sur le jeu test général. La classification semble donner de très bons résultats puisque l'erreur



générale est de 1,2 %. Il est à noter que seul 2 % des pixels forêt sont mal classés et seul 0,5 % des pixels prédits comme étant de la forêt sont en réalité des pixels de sol nu.

L'index d'agrément KAPPA donné par cette matrice de confusion est de 0,97. Ceci signifie que la classification utilisée évite 97 % des erreurs commises par une classification réalisée totalement au hasard [28].

La classification est donc très bonne sur les quatre zones de la carte. Appliquée à l'ensemble de la zone, elle est très acceptable. Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'elle a tendance à sous estimer le couvert forestier.

La carte résultant de la classification va donc pouvoir me servir de carte de référence. Elle va donc me permettre d'évaluer de manière relativement précise la quantité de couvert forestier dans les pixels MODIS.

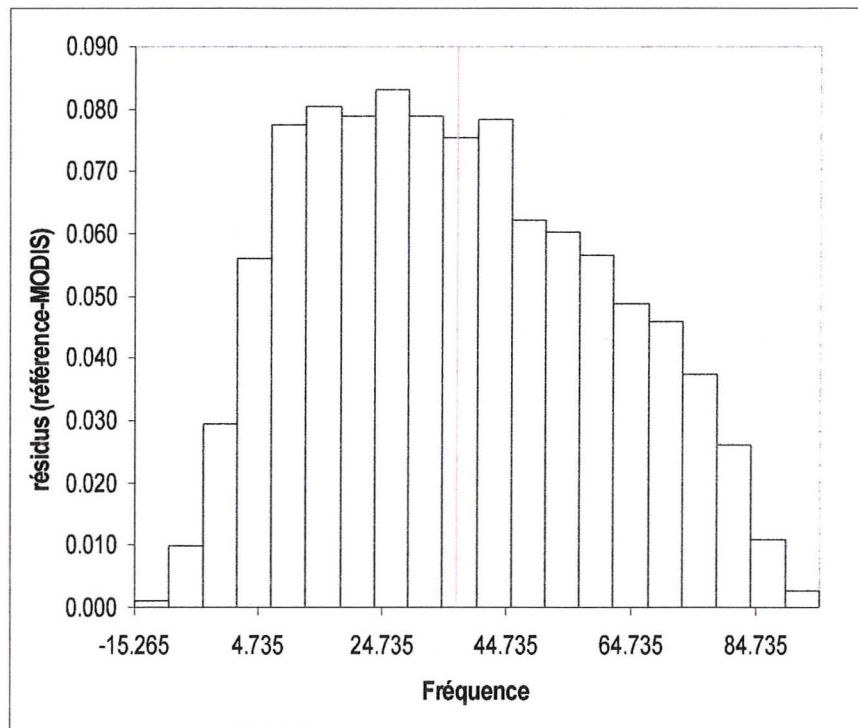
## **2. Résultat de la comparaison avec les données VCF MODIS**

### **2.1. Résultats généraux sur la zone d'étude**

La comparaison entre les résultats de la classification supervisée et les données MODIS montre que ce dernier sous estime le couvert végétal dans la majorité des cas. Pour bien prendre conscience des écarts entre évaluation par classification et valeurs MODIS, la carte de résidus a été créée. Elle montre la valeur de couvert forestier donnée par la classification moins celle donnée par MODIS pour chaque pixel (cf. Figure 12).

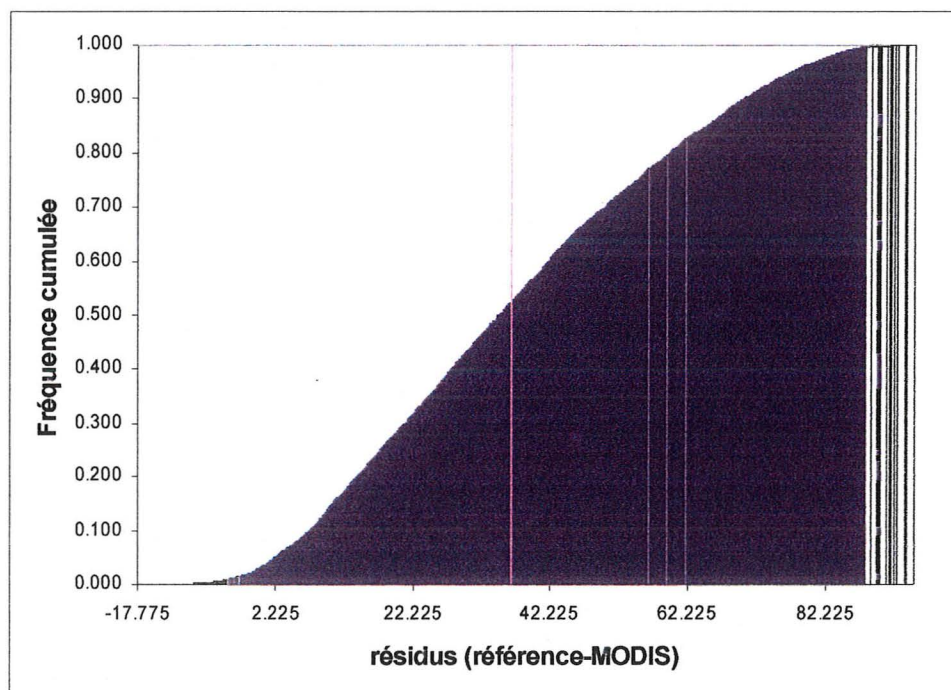
La carte de résidu montre que MODIS commet bien souvent de gros écarts avec notre estimation. Peu de pixels de 500m (7 %) sont justement évalués par MODIS (écart avec la classification de moins de 5 %). Une grosse majorité des pixels, soit 57 %, sont sous estimés par MODIS ( plus de 30 % inférieures aux valeurs données par la classification).

Le résidu moyen sur la zone est de 37 %. En moyenne, les données MODIS sous estiment donc le couvert forestier de près de 40 %. L'écart type à la moyenne est de 23 %.



**Figure 10: Histogramme de répartition des résidus en proportion.** En ordonnées, en multipliant par 100, on tombe sur la fréquence d'apparition des résidus. La barre rose représente la moyenne de résidus (37%).

La Figure 10 donne le nombre de pixels, en proportion, par classe de résidu. Il semble que la majorité des résidus soit au dessus des 20 %. Peu de pixels sont compris dans la zone de résidus -20 / 20 % (moins de 30 %).



**Figure 11: Distribution cumulée des résidus,** l'ordonnée est en proportion de pixels la barre rose représente la moyenne des résidus (37 %)



## 2.2. Résultats locaux suivants le type de formation végétale

Au vu des résultats généraux, il semble intéressant d'évaluer les prédictions MODIS dans différentes zones caractéristiques. J'ai donc créé un masque sur la zone avec différents identifiants suivant le type de zone.

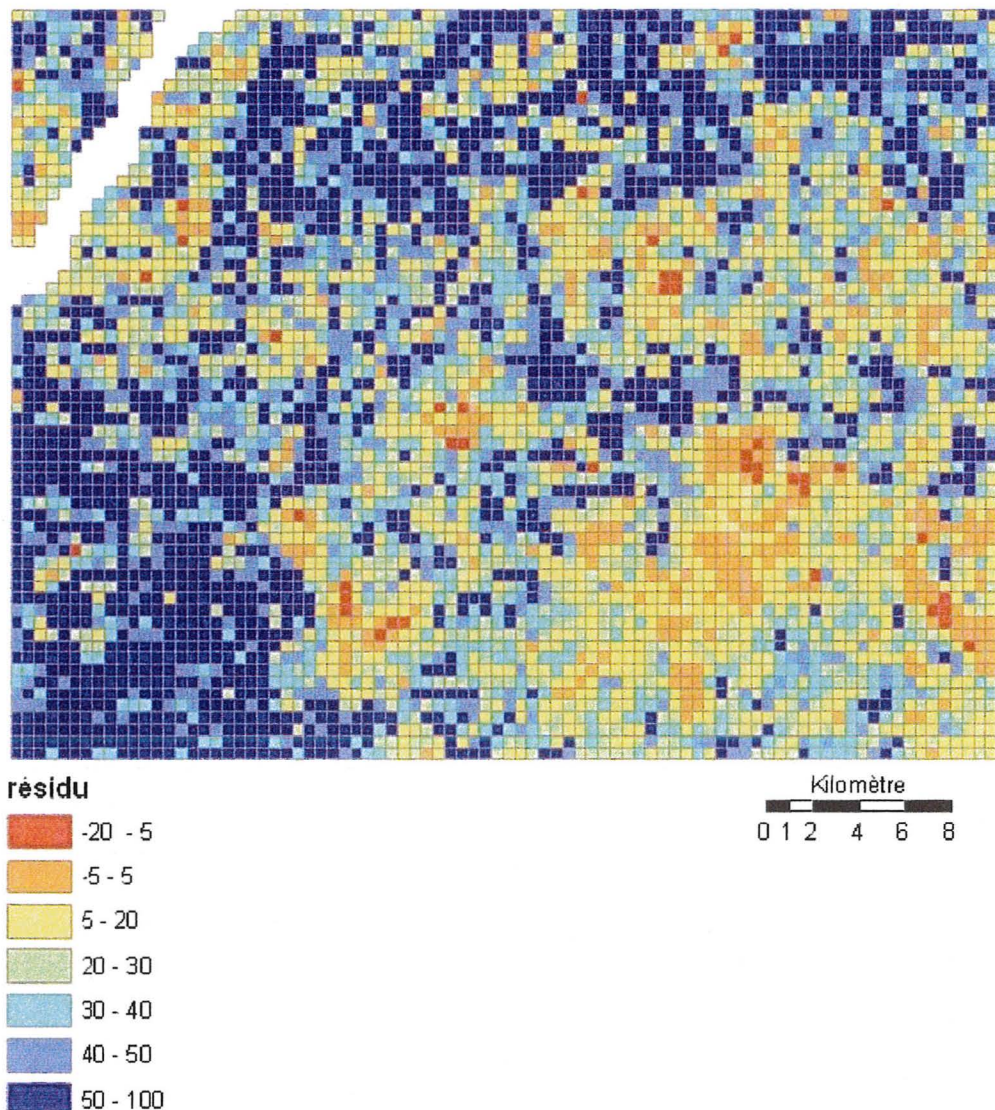


Figure 12: Carte des résidus entre la carte de pourcentage forestier calculé à partir de la classification et les données MODIS à une résolution de 500 m. La zone en blanc représente le fleuve Niger qui n'a pas été prise en compte dans le calcul des résidus.

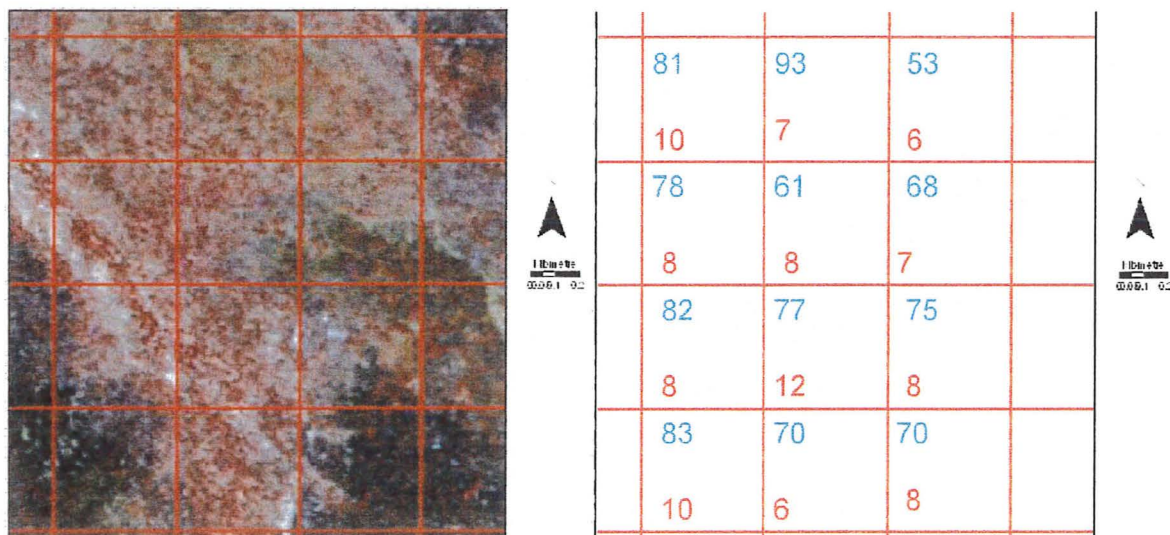
La carte donne l'impression que la zone de forêt classée est tout particulièrement mal évaluée par MODIS et que les zones de plaine sont quand à elles un peu mieux évaluées.

Dans les quatre grandes formations végétales, le couvert forestier MODIS a une nette tendance à la sous estimation (cf. Annexe 9, 10, 11, 12).

La zone la moins bien représentée par MODIS est la zone de forêt. Dans cette zone MODIS sous estime le couvert forestier d'au minimum 20 % et jusqu'à 80 %. CE résultat est contre intuitif, car il paraît pourtant logique que MODIS VCF qui est à une résolution de 500 m



donne de meilleurs résultats sur des zones homogènes à 500 m. Or la forêt classée est le milieu le plus homogène et le plus boisé de notre zone d'étude. Cependant il semblerait que MODIS ait des problèmes d'estimation du couvert forestier dans les zones fortement boisées (supérieur à 80 %) [22].



**Figure 13:** Extrait de la zone de forêt classée avec la grille de calage à 500 m de résolution. À gauche il y a la composition colorée issue de l'image SPOT 5 multicanaux et à droite, les valeurs données par la classification (bleu) et MODIS en (rouge) dans les pixels

La Figure 13 permet d'apprécier la qualité de l'estimation MODIS sur un extrait de la forêt classée de la Faya. Il apparaît qu'il y a un énorme écart entre la carte de taux de couvert forestier de référence et MODIS. Il semble aberrant que MODIS ne donne pas de couvert forestier supérieur à 12 % dans cette zone de forêt claire où le taux de couvert moyen est de l'ordre de 90 % [4].

La zone la mieux évaluée est la zone de plateau. MODIS y reste quand même très loin des valeurs données par la carte de référence.

Cependant, sur toutes les zones, la comparaison montre que MODIS donne de mauvaise estimation. Il n'y a aucune corrélation évidente entre les données MODIS et le couvert forestier évalué.

Ainsi, les pourcentages de couvert forestier donnés par MODIS sont très éloignés de ceux donnés par la classification que ce soit en général ou sur les différents milieux pris séparément. Il faut donc rester prudent quand à la qualité de MODIS VCF et à son utilisation sur le territoire malien. Les mauvais résultats de MODIS peuvent venir de plusieurs points.

### **3. Ce qui peut expliquer les écarts entre la carte de référence et les données MODIS dans la zone**

Les résultats précédemment énoncés peuvent être expliqués par plusieurs facteurs. D'abord par le fait que la classification mise en place comporte des imprécisions quand à l'estimation du couvert forestier. Ensuite, car le décalage temporel entre les deux images influe sans doute sur la comparaison. Enfin, car les différences d'échelles peuvent aussi influencer sur les résultats de l'étude.

### 3.1. La précision de la classification

La qualité de la classification mise en place peut influencer sur les résultats de la comparaison avec MODIS VCF. Les différentes évaluations de la classification (cf. partie supérieure) ont montré que la qualité de la classification était plus que satisfaisante. L'erreur générale sur les quatre sites d'évaluation est de 1,3 %. De plus, il a été montré dans les parties précédentes que la classification mise en place sous estime la végétation. Ceci signifie que MODIS sous estime dotant plus la végétation.

Pour vérifier la qualité de la classification et pour être sûr que ce n'est pas elle qui pose problème, j'ai comparé la classification au NDVI dégradé à 125 m (cf. Annexe 15). J'ai choisi cette résolution de 125 m car elle est multiple de 5, ce qui rendra le passage de la carte de référence à 5 m à 125 m plus facile. Je n'ai pas pu descendre en dessous de 125 m de résolution. D'abord parce que si la résolution est trop fine, il n'y aura plus assez de pixels de 5 m pour créer un pourcentage de couvert forestier et ensuite parce que la puissance de l'ordinateur ne me permettait pas de descendre en dessous.

Il apparaît qu'il y a une relation entre le pourcentage de couvert forestier donné par la classification et le NDVI moyen à 125 m. Ceci montre que notre classification réagit de manière « logique » au taux de couvert forestier et que les erreurs de classification ne peuvent expliquer à elles seules l'absence de corrélation avec MODIS VCF.

### 3.2. Le Changement d'échelle

Pour étudier l'effet du changement d'échelle j'ai dégradé le NDVI à plusieurs résolutions. Je l'ai dégradé de 5 à 125 m, puis de 5 à 250 m et enfin de 5 à 500 m, résolution de MODIS. Cette dégradation progressive de la résolution va permettre d'évaluer si il existe une résolution à partir de laquelle le phénomène observé n'est plus bien représenté.

J'ai ensuite mis en relation le NDVI et la classification pour déterminer si il existe une relation entre le pourcentage de couvert forestier donné par la classification et le NDVI. J'ai ensuite étudié la moyenne et l'écart type des données par tranche de couvert de 10 % (cf. Annexe 6, 7, 8). Le but étant de voir si la densité de couvert joue sur la qualité des données MODIS.

Il apparaît que plus la résolution est fine, plus les moyennes de NDVI sont différentes et étalées.

Lorsque l'on observe les différentes courbe NDVI-pourcentage de couvert forestier (cf. Annexe 13, 14, 15), il apparaît que plus l'information est dégradée moins la relation les liant est forte. Les moyennes des différentes classes sont de plus en plus proches (cf. Annexe 6, 7, 8). Ainsi le passage à une résolution inférieure entraîne un lissage des données et donc une diminution des différences inter-classes. Il est donc plus difficile de déterminer la nature d'un pixel à 500 m qu'à 125 m. Il semblerait aussi lorsque l'on observe les courbes NDVI-pourcentage forestier à 125 m et 250 m de résolution que la relation les liant est de type sigmoïde.

Ceci explique en partie les résultats de la carte MODIS dans notre zone. En effet, la qualité de la perception de la végétation semble se dégrader avec la baisse de résolution. Le capteur MODIS est à basse résolution. La résolution n'est peut être pas suffisante pour bien appréhender le couvert végétal dans la zone d'étude.



### **3.3. Le décalage temporel**

Il ne faut pas oublier de modérer cette étude par le fait que les deux images sont décalées dans le temps.

Il faudrait refaire la comparaison entre la classification et les données MODIS VCF de 2004 lorsqu'elle seront à nouveau en téléchargement sur les serveurs de la NASA. Il suffira pour cela de remettre en oeuvre les méthodes de comparaison décrites dans ce mémoire en remplaçant l'image MODIS de 2001 par l'image de 2004. Cette comparaison permettra de vérifier si les écarts de taux de couvert forestier ne sont pas liés aux décalage temporel.

Cependant, le produit VCF de MODIS sous estime systématiquement le couvert forestier par rapport à la classification supervisée. Or, la tendance au Mali n'étant pas au reboisement intensif, il est peu probable que les espaces se soient reboisés de plus de 20 % en trois ans. De plus, si la différence de couvert forestier entre nos deux sources n'était liée qu'au décalage temporel, il serait probable que l'on obtienne un biais systématique sur la zone ce qui n'est pas le cas.

### **3.4. Le décalage spatial**

Dans la première partie de ce devoir, les données ont été recalées spatialement entre elles. Il ne faut pas oublier que cette étape nous permet uniquement d'affirmer que nos données sont bien calées à 500 m près. Sur la zone d'étude, les transitions entre les différentes formations végétales sont très rapides et les formations n'occupent pas en générale de grosse surface. 500 m d'imprécision peuvent donc influencer sur le type de couvert présent. Ce problème est un problème intrinsèque à la résolution du capteur MODIS. Ce problème se posera dans toutes les études se basant sur les données MODIS.

Ainsi, il semble que MODIS donne de mauvais résultats sur notre zone d'étude. Il ne semble donc pas raisonnable d'utiliser les images MODIS à des fins de suivi de la ressource ligneuse sur notre zone.

C'est pour cela que dans un deuxième temps, et au vu des résultats de la corrélation entre le NDVI calculé à partir des données SPOT 5 et les pourcentages de couvert forestier, nous nous sommes demandés si il ne serait pas intéressant d'utiliser des images LANDSAT pour suivre la ressource ligneuse. Les images LANDSAT sont à 30 m de résolution mais sont beaucoup moins cher que les images SPOT 5. Elles sont donc plus facilement accessibles aux organisations maliennes.

## **4. Comparaison entre LANDSAT et la classification**

### **4.1. L'images LANDSAT**

Les images LANDSAT sont des images à 30 m de résolution spatiale. Elle contiennent 7 bandes spectrales (bleu, vert, rouge, 2 bandes dans le proche infrarouge, et 2 bandes dans le moyen infrarouge [29]).

Les images LANDSAT sont au prix de 0,019 \$US le km<sup>2</sup>, soit 0,014 € le km<sup>2</sup> (au taux de change du 30 août 2007 [30]). Une scène LANDSAT couvre 172,8km sur 182 km soit 32 000 km<sup>2</sup>. Une scène LANDSAT coûte 443 €. Ces images restent abordables surtout qu'elles couvrent une grosse zone .



	Largeur spectrale en nm	résolution en m
Bleu	450-515	30
Vert	525-605	30
Rouge	630-690	30
Proche infrarouge 1	750-900	30
Proche Infrarouge 2	1550-1750	30
Moyen Infrarouge 1	10400-12500	60
Moyen Infrarouge 2	2090-2350	30

**Tableau 10: Propriété spectrale et résolution spatiale de l'image LANDSAT [29]**

L'image dont je dispose sur la zone a été prise le 12 décembre 2002. À cette époque, comme je l'ai expliqué précédemment, la strate herbacée et quasiment inexistante. Il sera donc possible sur cette image d'assimiler végétation à ressource ligneuse. Tout ce qui aura une réaction typique de végétaux sera de la forêt.

L'image LANDSAT est plus vieille de deux ans que l'image SPOT 5. Il faudra donc, au vu du décalage temporel, être prudent sur les résultats.

#### **4.2. Création d'une image de NDVI**

Pour savoir si le NDVI calculé à partir de l'image LANDSAT est proportionnel au pourcentage de couvert forestier, j'ai créé une carte de NDVI à partir d'une image LANDSAT de la zone.

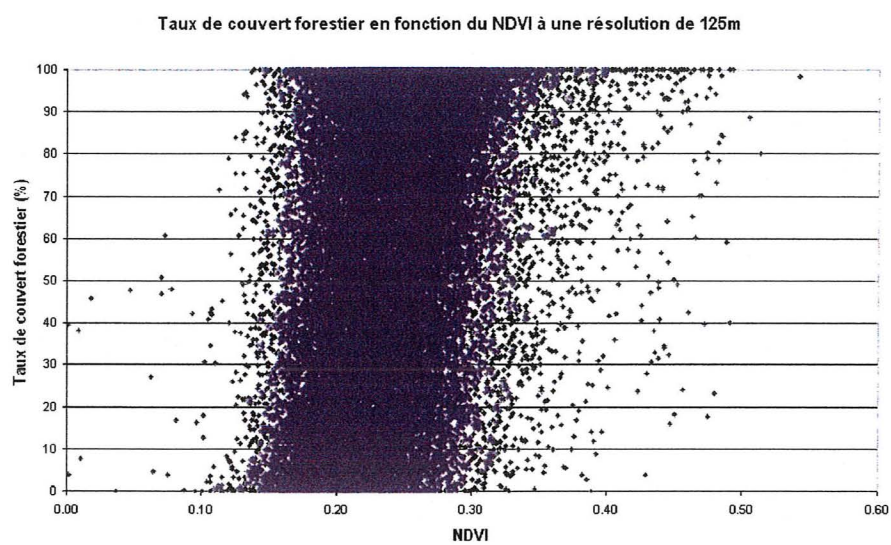
J'ai ensuite moyenné le NDVI à différentes échelles, 125, 250 et 500 m en utilisant les mêmes techniques que pour dégrader la classification.

J'ai ensuite pu comparer les moyennes de NDVI aux pourcentages de couvert forestier donnés par la classification.

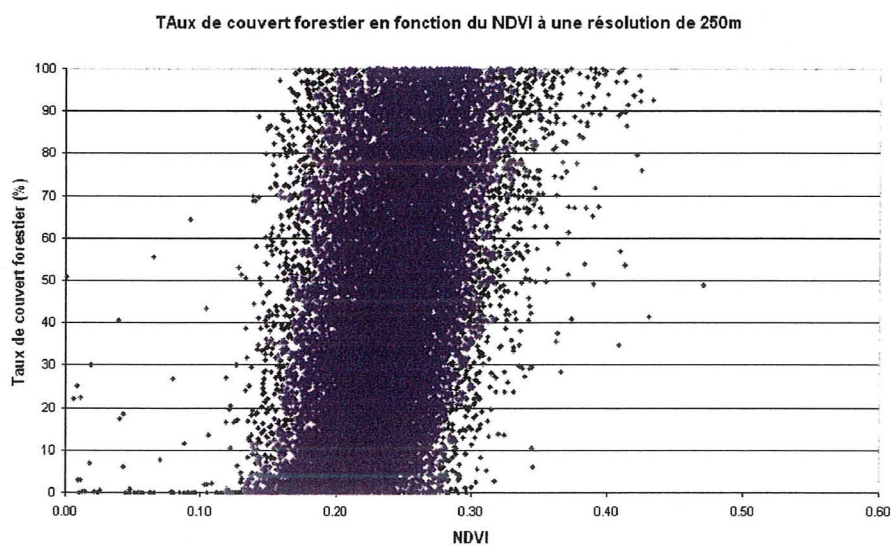
#### **4.3. Résultats de la comparaison NDVI LANDSAT-Taux de couvert forestier**

Les comparaisons entre le taux de couvert forestier et le NDVI aux différentes résolutions ont données les courbes ci dessous.

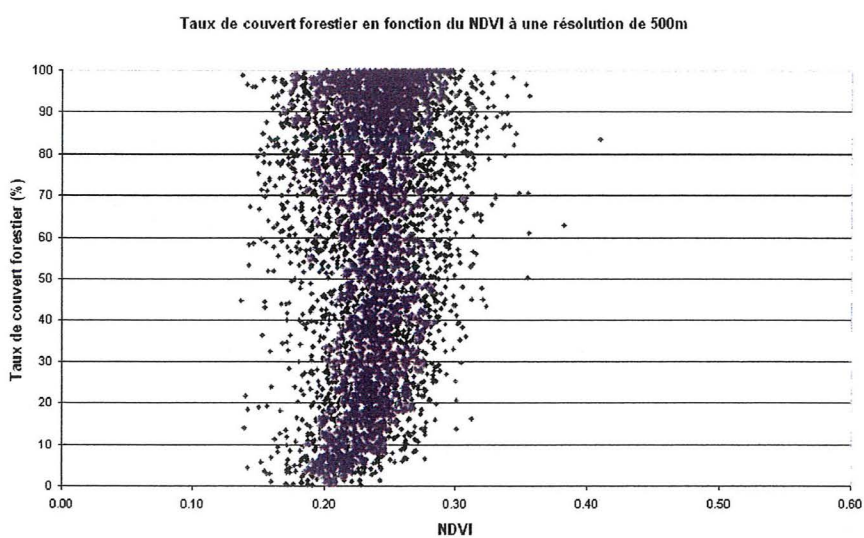
À 500 m de résolution, il apparaît comme avec les images SPOT 5 qu'il n'y a pas de corrélation entre NDVI et taux de couvert forestier. À 250 m, commence à apparaître la relation sigmoïde qui était déjà observable avec les images SPOT 5. Ce qui est bizarre c'est que contrairement à ce qui se passe avec les images SPOT 5, ici le passage à 125 m semble diminuer la précision de la relation NDVI-taux de couvert forestier. Il semblerait qu'il y ait plus de bruit à 125 m qu'à 250 m. Ce résultat n'est pas en accord avec ce qui a été prouvé par White et al [22] ni d'ailleurs avec ce qui a été montré précédemment à partir des images SPOT 5.



**A**



**B**



**C**

**Figure 14: Courbe du taux de couvert forestier en fonction du NDVI calculé à partir des images LANDSAT à trois résolution. A : résolution 125 m, B : résolution 250 m, C : résolution 500 m**



## Partie 5. Conclusion Discussion

Au vu de ce travail d'évaluation de la qualité des données MODIS VCF, elles ne semblent pas utilisables en l'état sur la zone d'étude. Les tests, mis en place dans cette étude, ont montrés qu'elles sous estiment le taux de couvert forestier, sans qu'il y ait un biais systématique permettant de revenir au taux de couvert forestier réel. Elles doivent donc être utilisées avec beaucoup de précautions par les organisations travaillant sur la ressource ligneuse au Mali dans les problématiques de suivi de la ressource.

Dans ce mémoire, j'ai essayé de mettre en évidence des raisons qui pourraient expliquer les mauvais résultats de la comparaison sur la zone entre les données MODIS VCF et la carte de référence établie. D'abord il faut garder à l'esprit que ce travail de comparaison a été fait entre deux images avec trois ans de décalage. Il est vrai que la tendance au Mali n'est pas au reboisement et que donc MODIS (la plus vieille des deux images) devrait surestimer le taux de couvert forestier plutôt que le sous estimer.

Ensuite, l'image de référence a été créée par photointerprétation de l'image multicanale SPOT 5. Elle n'est pas issue d'un inventaire de terrain, bien qu'elle repose néanmoins sur un travail de reconnaissance des différentes formations végétales sur le terrain. Ainsi, l'image de référence peut être remise en cause dans son intégrité. Cependant, les différents tests de la qualité de la carte de référence ont montrés qu'elles étaient de bonne qualité.

Il serait intéressant de refaire les même tests, que ceux mis en oeuvre dans ce mémoire, sur l'image MODIS VCF 2004, quand et si elle est à nouveau téléchargeable, pour voir si les corrections apportées sur ces images améliore son usage sur la zone.

Cependant, les limites observées en terme de résolution ne pourront certainement pas être surmontées. Cette étude montre que le NDVI est lié au taux de couvert forestier jusqu'à une certaine résolution. À 500 m, la corrélation entre le NDVI et le taux de couvert est très mauvaise. Les produits VCF MODIS est calculé sur la base du NDVI. Il est peut être pour l'instant non envisageable d'imaginer un suivi de la ressource ligneuse à grande échelle via des systèmes à basse résolution. Il serait donc intéressant d'essayer de travailler sur le NDVI pour obtenir une relation avec le taux de couvert en lui associant d'autres indices caractéristiques des sols (Indice de Brillance des Sols, Indice de Cuirasse,...) qui amélioreraient peut être la qualité de la classification. Il serait aussi intéressant de tester l'efficacité de l'indice PVI (Perpendicular Vegetation Index), qui intègre des caractéristiques du sol.

Il serait également intéressant de se pencher à nouveau sur les images LANDSAT qui peuvent peut-être un bon compromis entre l'image gratuite MODIS mais non fiable et l'image SPOT 5 onéreuse et fiable. Durant mon stage j'ai essayé d'évaluer la qualité du NDVI issu de LANDSAT comme indicateur du taux de couvert et je n'ai pas obtenu d'excellents résultats. Ceci est peut être lié à la qualité de l'image qui n'est peut être pas très bonne, au décalage temporel qui là peut jouer un plus grand rôle que sur les images MODIS où le NDVI est intégré sur l'année. Là encore, il serait intéressant de coupler d'autre indices au NDVI pour affiner la classification.

Il serait aussi très intéressant de mettre en place une campagne de vérité terrain plus approfondie pour mettre en place des zones « d'apprentissage » pour les éventuelles futures classifications.



## Bibliographie

- [1] : World Bank ( 2002). **World development report 2003 : Sustainable development in a dynamic world : transforming institutions growth and quality of life**. Oxford University Press, New York; Washington DC , 272p
- [2] : Hautdidier Baptiste (2000-2001). **les marchés ruraux de bois au Mali, un modèle de gestion forestière communautaire en question..** DEA Aménagement, Développement, Environnement, Université d'Orléans, Orléans, 123p
- [3] : Site du CIRAD (page consultée le 24/07/07) **Bienvenue au CIRAD**. [http://www.cirad.fr/fr/le\\_cirad/index.php](http://www.cirad.fr/fr/le_cirad/index.php)
- [4] : Nasi R, Sabatier M. ( 1988). **Projet d'inventaire des ressources ligneuses au Mali, Rapport de synthèse, Première Phase, les formations végétales**. CIRAD, Montpellier, 205
- [5] : Nasi Robert (1994). **La végétation du centre régional d'endémisme soudanien au MALI, étude de la forêt des Monts Mandingues et essai de synthèse**. Docteur en sciences, Université Paris XI Orsay, Paris, 176p
- [6] : Defourny Pierre (1990). **Méthodes d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano sahélienne à partir des données Landsat TM (Burkina Faso)**. In : *Télédétection et sécheresse*. Aupelf-Urep, Paris, pp. 63-74.
- [7] : Ozer Pierre ( 2004), **Bois de feu et déboisement au sahel : mise au point**. *Sécheresse*, vol 15 n°3, pp. 243-51.
- [8] : Barbier Claude ( 2004). **Désertification et forêts**. Silva Riat, Clamecy, 159p
- [9] : United Nations Development Program (UNDP) ( 1999). **Energy as a tool for sustainable development for ACP countries**. United Nations Publications, Bruxelles, 134p
- [10] : Touré I.O. ( 2001). **Revue des données du bois énergies au Mali**, FAO.
- [11] : Nowark D.J., Rowntree R.A and al (1996), **Measuring an analysing urban tree cover**. *Landscape and Planning*, 36, pp. 49-57.
- [12] : Rouse J.W., Haas R.H. ( 1974). **Monitoring the vernal advancement of natural vegetation**. NASA/GSFC Final Report, , pp. 309-317
- [13] : Townshend J.R.G Justice C.O. (2002), **Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing**. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 351-359.
- [14] : Brun Julien (2004). **Etude du potentiel des indices de végétation de l'imagerie MODIS pour l'observation de l'évolution intra- et inter-annuelle de la couverture du sol**. certificat de spécialisation en géomatique, Université de Genève, Genève,

- [15] : Site de téléchargement des images MODIS (page consultée le 17/07/2007) **MODIS/Terra Vegetation Continuous Fields Yearly L3**. <http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod44bv4.asp>
- [16] : Fischer Jeremy I., Mustard John F. (2007), **Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and Modis-data**. *Remote Sensing of Environment*, 109, pp. 261-273.
- [17] : Morisette Jeffrey T. Morisette (2002), **A framework for the validation of MODIS Land Products**. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 77-96.
- [18] : Sprintsin Michael, Karnieli Arnon (2007), **The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone**. *Remote Sensing of Environment*, 109, pp. 416-428.
- [19] : Hayes Daniel J., Cohen Warren B. (2007), **Estimating proportional change in forest cover as continuous variable from multi-year MODIS data**. *Remote Sensing of Environment*, en cours de publication, doi:10.1016/j.rse.2007.06.003.
- [20] : M.A Friedl (2002), **Global Land Cover mapping from Modis : algorithms and early results**. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 287-302.
- [21] : Hansen M. C., Defries R.S (2002), **Development of a MODIS tree cover validation data set for western province Zambia**. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 320-335.
- [22] : White M.A., Shaw J.D., Ramsey R.D. (June 2005), **Accuracy assesment of the vegetation continuous field tree cover product using 3954 ground plots in the south-western USA**. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 12, pp. 2699-2704.
- [23] : Evaluation of the MODIS continuous tree cover map over the UK (page consultée le 07/07/08) **Numerical Terradynamic Simulation Group**. [www.ntsg.umt.edu/MODISVeg.2004/posters/disney\\_missoula04.ppt](http://www.ntsg.umt.edu/MODISVeg.2004/posters/disney_missoula04.ppt)
- [24] : Mougenot B. et Hamani S. (1997). **Les possibilités de classification des formations contractées à partir de la télédétection aérienne et satellitaire. Exemple dans l'ouest nigérien**. In : *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey EUROTEXT, Paris, p. 59.
- [25] : Descriptif des données Spot 5 (page consultée le 17/07/2007) **Les systèmes embarqués à bord de SPOT 5**. <http://www.educnet.education.fr/obter/actua/spot5.htm>
- [26] : (), **Description des caractéristiques spectrales SPOT** (page consultée le 05/09/2007). , , .
- [27] : Bonn Ferdinand, Rochon Guy ( 1996). **Précis de télédétection**. Presse de l'Université du Québec / AUPELF, , 485p
- [28] : Girard Michel-Claude, Girard Colette M. ( 1999). **Traitement des données de télédétection** . DUNOD, Paris, 552p

[29] : Description des images LANDSAT (page consultée le 30 août 2007). **Landsat-Wikipédia**. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Landsat>

[30] : Taux de change du dollar (page consultée le 30 août). **YES-CHANGE**. <http://www.yes-change.com/cadres/frame07.html>



## Annexe

Annexe 1. Photographie d'une zone de forêt classée dans la forêt de la Faya.....	50
Annexe 2. Photographie d'une zone de savane arbustive. ....	50
Annexe 3. Photographie d'une zone de parc verger. Les sillons de cultures sont bien apparent ainsi que les karités.....	51
Annexe 4. Photographie d'une zone de bowal. Les zones de sol nu indurées peuvent être très vastes, les zones de végétation sont visibles dans le fond de la photographie.....	51
Annexe 5. Tableau récapitulatif la taille (en ha) des échantillons de tests de la classification par type de formation végétale et par type de couvert (sol nu ou forêt).....	52
Annexe 6. Tableau récapitulatif donnant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 500 m.....	53
Annexe 7. Tableau récapitulatif le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne du NDVI par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 250 m.....	54
Annexe 8. Tableau récapitulatif le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 125 m.....	55
Annexe 9. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage forestier MODIS sur la zone de la forêt classée de la Faya.....	56
Annexe 10. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage de couvert MODIS sur la zone de savane arbustive.....	57
Annexe 11. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de savane verger.....	58
Annexe 12. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de bowé.....	59
Annexe 13. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 500 m.....	60
Annexe 14. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 250 m.....	61
Annexe 15. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 125 m.....	62

**Annexe 1. Photographie d'une zone de forêt classée dans la forêt de la Faya.**



**Annexe 2. Photographie d'une zone de savane arbustive.**





**Annexe 3. Photographie d'une zone de parc verger. Les sillons de cultures sont bien apparent ainsi que les karités.**



**Annexe 4. Photographie d'une zone de bowal. Les zones de sol nu indurées peuvent être très vastes, les zones de végétation sont visibles dans le fond de la photographie**





**Annexe 5. Tableau récapitulant la taille (en ha) des échantillons de tests de la classification par type de formation végétale et par type de couvert (sol nu ou forêt).**

	Zone de plateau	Zone de plaine	Zone de forêt	Zone de jachère	Total
forêt	12	20,5	39,5	5,5	77,5
Sol nu	63	100	27,5	1,5	192
Total	75	120,5	67,5	7	269,5

**Annexe 6. Tableau récapitulatif donnant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 500 m**

500 m	NDVI moyen	Écart type	Écart type en %
0-10 %	0.026	0.015	58
10-20 %	0.040	0.016	40
20-30 %	0.046	0.019	41
30-40 %	0.049	0.021	43
40-50 %	0.051	0.024	47
50-60 %	0.055	0.026	47
60-70 %	0.050	0.031	62
70-80 %	0.049	0.033	67
80-90 %	0.053	0.031	58
90-100 %	0.047	0.032	68
total	0.047	0.028	60



**Annexe 7. Tableau récapitulant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne du NDVI par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 250 m**

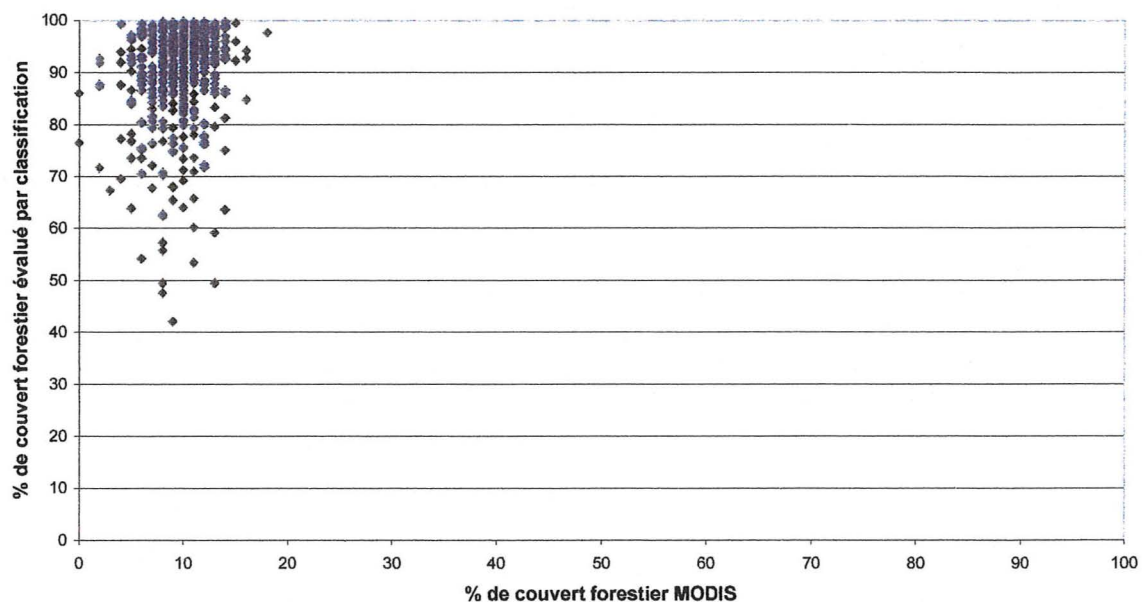
250 m	NDVI moyen	Écart type	Écart type en %
0-10 %	-0.010	0.062	620
10-20 %	0.023	0.021	91
20-30 %	0.034	0.020	59
30-40 %	0.041	0.018	37
40-50 %	0.049	0.018	37
50-60 %	0.058	0.017	29
60-70 %	0.065	0.018	28
70-80 %	0.073	0.018	25
80-90 %	0.083	0.022	26.5
90-100 %	0.095	0.026	27
total	0.044	0.042	95

**Annexe 8. Tableau récapitulant le NDVI moyen et l'écart type à la moyenne par tranche de couvert forestier de 10 % à une résolution de 125 m**

125 m	NDVI moyen	Écart type	Écart type en %
0-10 %	-0.012	0.067	558
10-20 %	0.024	0.022	91
20-30 %	0.033	0.021	63
30-40 %	0.040	0.020	50
40-50 %	0.049	0.019	38
50-60 %	0.056	0.019	34
60-70 %	0.064	0.019	29
70-80 %	0.072	0.020	28
80-90 %	0.081	0.021	26
90-100 %	0.098	0.030	31
total	0.046	0.050	109

# **Annexe 9. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage forestier MODIS sur la zone de la forêt classée de la Faya**

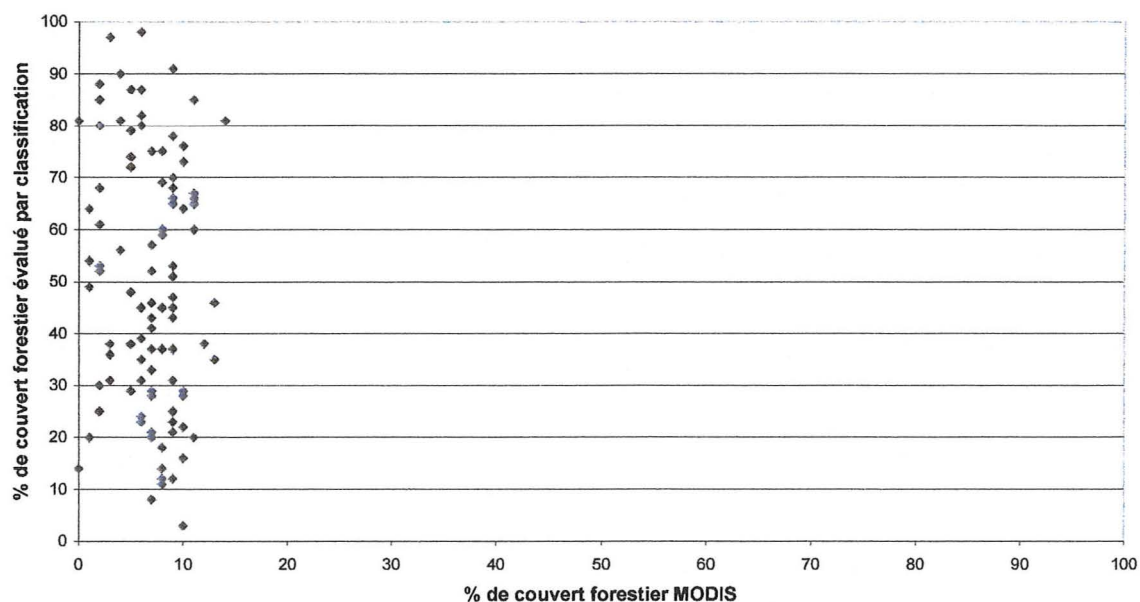
**Pourcentage de couvert forestier évalué par classification en fonction du pourcentage forestier MODIS sur la zone de la forêt classée de la FAYA**



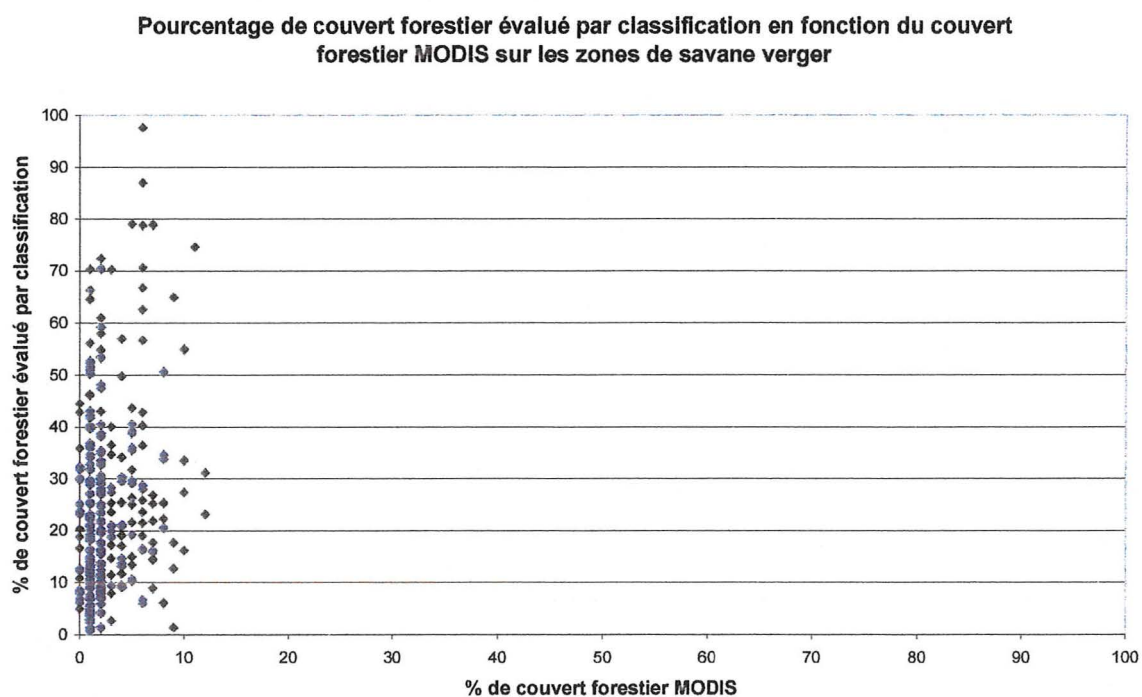


# **Annexe 10. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du pourcentage de couvert MODIS sur la zone de savane arbustive**

**pourcentage de couvert forestier évalué par la classification en fonction du pourcentage de couvert forestier MODIS sur les zones savanes arbustives**

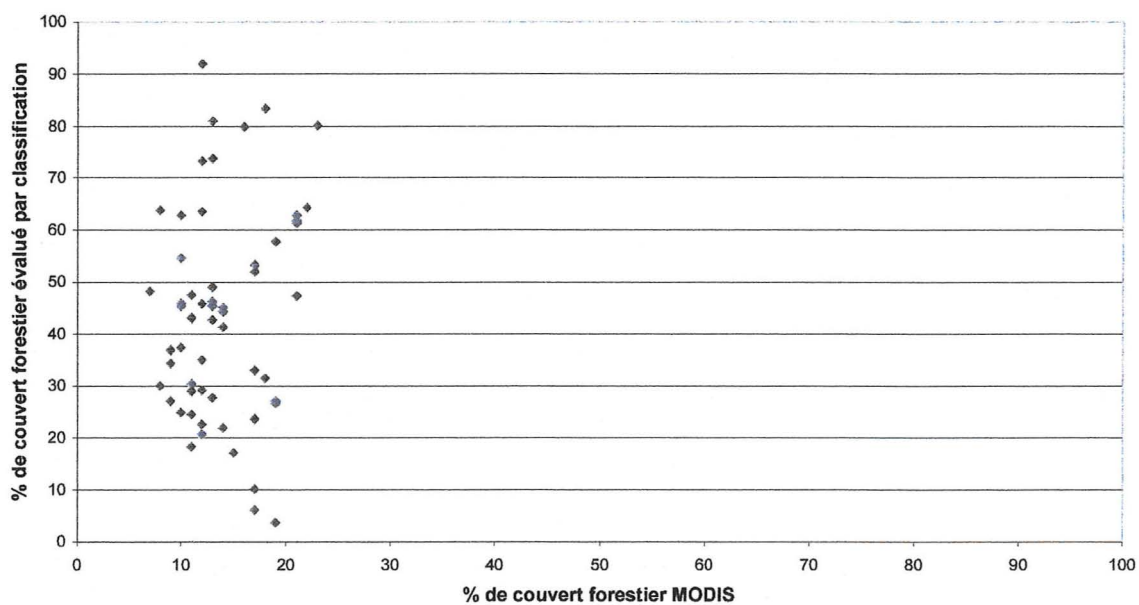


**Annexe 11. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de savane verger**



## Annexe 12. Pourcentage de couvert forestier évalué en fonction du couvert forestier MODIS sur la zone de bowé

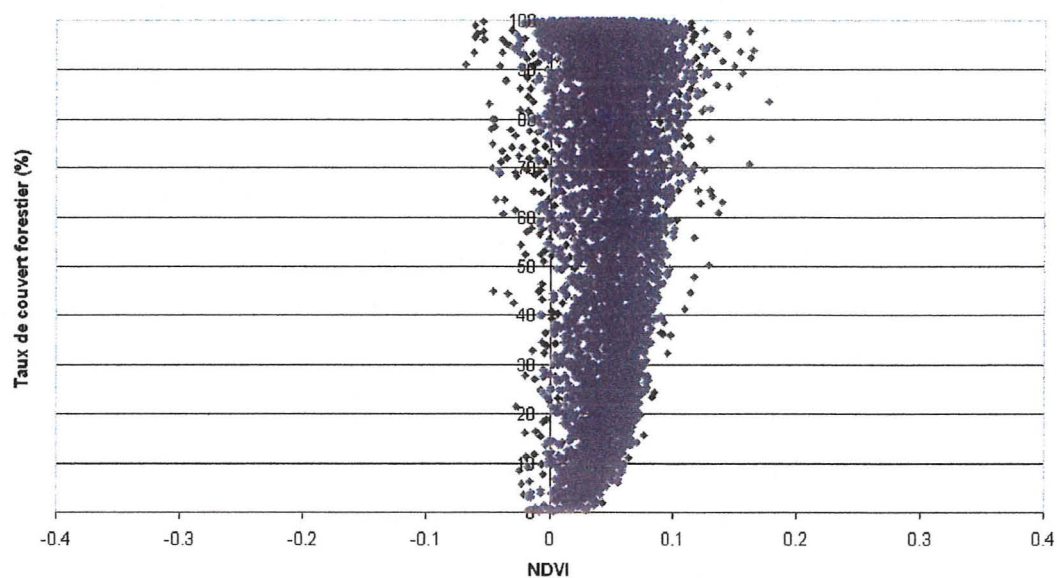
Pourcentage de couvert forestier évalué par classification en fonction du pourcentage forestier MODIS sur les zones de bowé





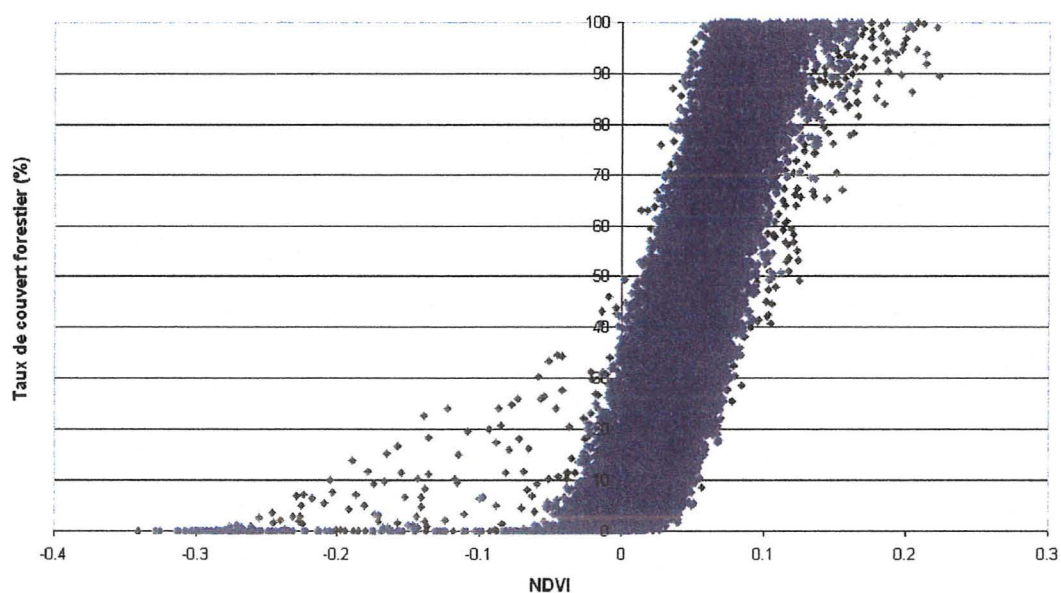
**Annexe 13. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 500 m**

**Taux de couvert forestier évalué à une résolution de 500m en fonction du NDVI**



**Annexe 14. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 250 m**

**Taux de couvert forestier évalué à une résolution de 250m en fonction du NDVI**



**Annexe 15. Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI calculé à partir des images SPOT 5 à une résolution de 125 m**

**Taux de couvert forestier évalué en fonction du NDVI à une résolution de 125m**

